

**VŠB– Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Optické zesilovače pro metropolitní optické sítě
Optical Amplifiers for Metropolitan Optical Networks**

2015

Lukáš Fojtík

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Fojtík**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika
Téma: Optické zesilovače pro metropolitní optické sítě
Optical Amplifiers for Metropolitan Optical Networks

Zásady pro vypracování:

Cílem zadané bakalářské práce je provést porovnání různých typů optických zesilovačů implementovaných do metropolitních optických sítí v rámci softwarové aplikace Optiwave OptiSystem. Jednotlivé topologie a druhy optických metropolitních sítí poté student porovná v rámci simulace z pohledu dosahu sítě, chybovosti, Q faktoru, výkonových a útlumových bilancí s implementovaným zesilovačem.

1. Nastudujte a popište metropolitní optické sítě.
2. Popište druhy optických zesilovačů pro optické sítě.
3. Simulace různých typů metropolitních sítí s implementovaným optickým zesilovačem v rámci softwarové aplikace Optiwave OptiSystem.
4. Vyhodnocení simulovaných výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


- PREMARATNE, M., Agrawal, G., P. *Light Propagation in Gain Media: Optical Amplifiers*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 284 s. ISBN 978-0521493482.
- BJARKLEV, A. *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications (The Artech House Optoelectronics Library)*, Vydání 1. Artech Print on Demand, 1993. 408 s. ISBN 978-0890066591.
- SHIMADA, S., Ishio, H. *Optical Amplifiers and their Applications*, Vydání 1. John Wiley & Sons, 1994. 288 p. ISBN 978-0471940050.
- LEEE, T. P. *Current Trends in Optical Amplifiers and Their Applications (Selected Topics in Electronics and Systems)*. World Scientific Pub Co Inc, 1996. 222 s. ISBN 978-9810226954.
- DUTTA, N a Qiang WANG. *Semiconductor optical amplifiers*. Vydání 2. ISBN 978-981-4489-034.
- NEMOVA, G. *Optical Amplifiers (Physics Research and Technology)*. Nova Biomedical Books, 2011. 337 s. ISBN 978-1612098357.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**


Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



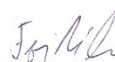


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 29. dubna 2015


.....
podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Janu Látalovi a Bc. Zdeňku Wilčkovi za poskytnutou pomoc a cenné informace při zpracování bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je provést porovnání různých typů optických zesilovačů implementovaných do metropolitních optických sítí v rámci softwarové aplikace Optiwave OptiSystem.

V první části je proveden rozbor dané problematiky - jsou zde popsány optické přístupové sítě, metropolitní sítě, důvod nasazení optických zesilovačů do metropolitní sítě a rozbor jednotlivých optických zesilovačů. V další části je provedena simulace WDM-PON sítě, do které je pak aplikován příslušný optický zesilovač. V poslední části práce se vyhodnocují nasimulované výsledky.

Klíčová slova

optická přístupová síť; metropolitní síť; optický zesilovač; výkon; zesílení; EDFA; SOA; Ramanův zesilovač; WDM-PON; simulace; Optiwave OptiSystem.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to compare different optical amplifiers implemented in metropolitan network in the context of software application Optiwave OptiSystem.

The first part is an analysis of the issue - there are described optical access networks, metropolitan area networks, due to the deployment of optical amplifiers into the metropolitan area networks and analysis of optical amplifiers. The next part is a simulation of WDM-PON networks in the program Optiwave OptiSystem, to which is then applied the appropriate optical amplifier. The last part is evaluated simulated results.

Key words

optical access network; metropolitan area network; optical amplifier; power; gain; EDFA; SOA; Raman amplifier; WDM-PON; simulation; Optiwave OptiSystem.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
z_{eff}	[m]	Efektivní délka
P_p	[W]	Výkon pumpy
P_s	[W]	Výkon signálu
C_R/A_{eff}	[–]	Účinnost Ramanova zisku
$I_{\text{SIG}}, I_{\text{PUMP}}, A_{\text{eff}}$	[m]	Efektivní průřez vlákna
m_e	[–]	Počet chybně přijatých bitů
v_t	[bit · s ^{–1}]	Přenosová rychlost
t_m	[s]	Celková doba měření
I_1	[–]	Logická úroveň "1"
I_0	[–]	Logická úroveň "0"
σ_1	[–]	Odchylka logické úrovně "1"
σ_0	[–]	Odchylka logické úrovně "0"

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
10-GEPON	10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network	10 Gigabitová ethernetová pasivní optická síť
AON	Active Optical Network	Aktivní optická síť
APON	ATM Passive Optical Network	ATM pasivní optická síť
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Zesílená spontánní emise
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Asynchronní přenosový režim
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Vlnovody uspořádané do mřížky
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovost
BPON	Broadband PON	Širokopásmová PON
CATV	Cable Television	Kabelová televize
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex	Hrubý vlnový multiplex
DCF	Dispersion Compensating Fiber	Vlákno kompenzující disperzi
DRA	Distributed Raman Amplifier	Distribuovaný Ramanův zesilovač
DSF	Dispersion Shifted Fiber	Vlákno s posunutou disperzí
DWA	Dynamic Wavelength Assignment	Dynamické přidělování vlnových délek
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex	Hustý vlnový multiplex
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Erbium dopovaný vláknový zesilovač
EDWA	Erbium Doped Waveguide Amplifier	Erbium dopovaný vlnovodný zesilovač
EPON	Ethernet Passive Optical Network	Ethernetová pasivní optická síť
FDM	Frequency Division Multiplexing	Multiplex s frekvenčním dělením
FPL	Fabry-Perot Laser	Fabry-Perot laser
FTTB	Fibre To The Building	Vlákno do budovy
FTTC	Fibre To The Curb	Vlákno k chodníku
FTTD	Fibre To The Desk	Vlákno do přístroje
FTTH	Fibre To The Home	Vlákno do domu (zásuvky)
FTTN	Fibre To The Node	Vlákno do rozvaděče
FTTO	Fibre To The Office	Vlákno do kanceláře
GEM	GPON Encapsulation Method	metoda přenosu ATM buněk a Ethernet rámců v GPON
GPON	Gigabit Passive Optical Network	Gigabitová pasivní optická síť
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Institut pro elektronické a elektrotechnické inženýrství
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunikační unie
HD	High Digital	Vysoké rozlišení

IP-TV	Internet Protocol TV	Internet protokol TV
LRA	Lumped Raman Amplifier	Soustředěný Ramanův zesilovač
MQW	Multiple Quantum Wells	kvantové jamy
OAN	Optical Access Network	Optická přístupová síť
ODN	Optical Distribution Network	Optická distribuční síť
OLT	Optical Line Termination	Optické linkové zakončení
ONT	Optical Network Termination	Optické síťové zakončení
ONU	Optical Network Unit	Optická síťová jednotka
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry	Metoda měření zpětného rozptylu
P2MP	Point-To-Multipoin	spojení bod-více bodů
P2P	Point-To-Point	spojení bod-bod
PON	Passive Optical Network	Pasivní optická síť
QoS	Quality of Service	Kvalita služeb
RFL	Raman Fibre Laser	Ramanův vláknový laser
RSOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier	Reflektivní polovodičový zesilovač
SDM	Space Division Multiplex	Multiplex s použitím více optických vláken
SM	single mod	Jedno-modové vlákno
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Odstup signálu od šumu
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Polovodičový optický zesilovač
TDFA	Thulium Doped Fiber Amplifier	Thuliem dopovaný vláknový zesilovač
TDM	Time Division Multiplex	Časový multiplex
TW-SOA	Travelling-Wave SOA	Širokopásmový polovodičový optický zesilovač
VOIP	Voice Over Internet Protocol	Přenos digitalizovaného hlasu sítí
WDM	Wave Division Multiplex	Vlnový multiplex
WWDM	Wide Wavelength Division Multiplex	Široké dělení
xDSL	Digital Subscriber Line	Digitálně podepsaná linka

Obsah

Úvod.....	1
1. Popis optických sítí.....	2
1.1. Uspořádání optické přístupové sítě	2
1.2. Specifika přenosu optického signálu v přístupové síti	3
1.3. Aktivní optická síť (AON)	3
1.4. Pasivní optická síť (PON).....	4
1.4.1. Topologie pasivní optické sítě (PON)	4
1.4.2. První optické přístupové sítě (APON, BPON)	5
1.4.3. GPON	5
1.4.4. EPON.....	6
1.4.5. 10-GEAPON	6
1.4.6. XG-PON.....	6
1.4.7. WDM-PON.....	8
1.5. Metropolitní síť	11
2. Optické zesilovače.....	12
2.1. Vlastnosti a výhody optických zesilovačů.....	12
2.2. Zesílení, vstupní a výstupní výkon optického zesilovače.....	12
2.3. Nevýhody optických zesilovačů.....	13
3. Rozdělení optických zesilovačů	14
3.1. Rozdělení podle typu optického čerpání	14
3.2. Rozdělení podle umístění zesilovače na optické trase.....	15
3.2.1. Booster.....	15
3.2.2. In-line zesilovač.....	15
3.2.3. Předzesilovač.....	15
4. Vláknové zesilovače s dotací.....	16
4.1. Typy vláknových zesilovačů s dotací	16
4.2. Vlastnosti vláknových zesilovačů s dotací	16
4.2.1. Zisk.....	16
4.2.2. Saturační výkon	17
4.2.3. Saturační charakteristika	17
4.2.4. ASE (Amplified Spontaneous Emission) a šum.....	17
4.3. EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovač	18
4.3.1. Vlastnosti EDFA	18
4.3.2. Popis a schéma EDFA zesilovače	18

4.3.3.	Zisk EDFA zesilovače	19
4.3.4.	Laserové pumpy v EDFA	20
4.3.5.	Princip fungování EDFA zesilovače	20
4.3.6.	Výhody EDFA zesilovače	21
4.3.7.	Nevýhody EDFA zesilovače	21
4.4.	Ostatní vláknové zesilovače - PDFA, TDFA, YDFA	22
4.4.1.	PDFA zesilovač	22
4.4.2.	TDFA zesilovač	22
4.4.3.	YDFA zesilovač	22
5.	Polovodičové optické zesilovače (SOA)	23
5.1.	Historický vývoj	23
5.2.	Princip fungování polovodičového optického zesilovače	23
5.2.1.	Excitace media	23
5.2.2.	Inverze populace	24
5.2.3.	Generování zisku	24
5.3.	Struktura polovodičového optického zesilovače	24
5.4.	Typy přechodů a struktury u SOA	25
5.5.	Zisk a další vlastnosti SOA	26
5.6.	Výhody SOA	27
5.7.	Nevýhody SOA	27
6.	Ramanovské zesilovače	28
6.1.	Historický vývoj	28
6.2.	Princip Ramanovských zesilovačů	28
6.3.	Zisk Ramanovských zesilovačů	28
6.4.	Spektrum vlnových délek Ramanovských zesilovačů	30
6.5.	Struktura Ramanovských zesilovačů	30
6.6.	Typy Ramanovských zesilovačů	31
6.6.1.	DRA (Distributed Raman Amplifier) zesilovač	31
6.6.2.	LRA (LRA-Lumped Raman Amplifier) zesilovač	31
6.7.	Výhody Ramanova zesilovače	32
6.8.	Nevýhody Ramanova zesilovače	32
7.	Srovnání optických zesilovačů	33
8.	Simulace optických zesilovačů ve WDM-PON síti v programu OptiSystem	34
8.1.	Nastavené parametry WDM-PON	34
8.1.1.	Optické linkové zakončení (OLT)	34
8.1.2.	Optická distribuční část (ODN)	35

8.1.3.	Optická koncová jednotka (ONU).....	36
8.1.4.	Optické zesilovače.....	37
8.2.	Měřené parametry.....	40
8.3.	Výsledky simulace.....	42
8.3.1.	Simulace EDFA zesilovače	42
8.3.2.	Simulace polovodičového optického zesilovače (SOA).....	58
8.3.3.	Simulace Ramanova zesilovače.....	75
9.	Vyhodnocení	90
9.1.	Přijaté výkonové úrovně.....	90
9.2.	Q-faktor a chybovost	91
10.	Závěr.....	93
	Použitá literatura	94

Úvod

Optické zesilovače byly vynalezeny na počátku 80. let. Zesilovače mají schopnost překlenout optickou trasu na vzdálenost asi 200 km. V dnešní době se používají optické zesilovače na překlenutí tras delších než 100 km.

Na každé optické trase dochází ke ztrátám výkonu při přenosu, které vyžadují zesílení signálu po určité vzdálenosti. Signál je nutné zesílit, obnovit jeho tvar a původní polohu signálu v čase. Použitím optického zesilovače lze obnovit hlavně amplitudu optických symbolů.

Struktura práce se dělí na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány přístupové optické sítě, metropolitní sítě a tři druhy optických zesilovačů. Na konci teoretické části jsou parametry těchto zesilovačů zhodnoceny.

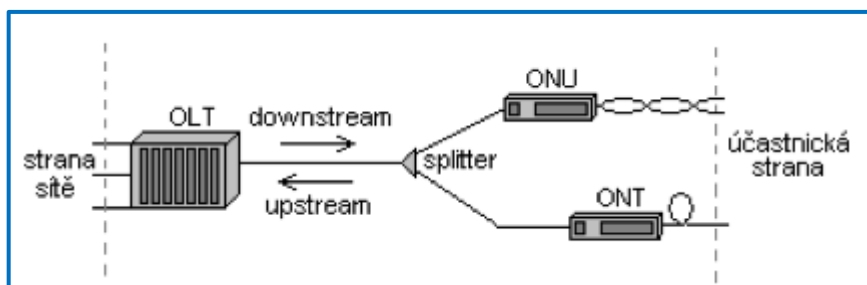
V praktické části je provedena simulace WDM-PON sítě, do které je pak aplikován příslušný optický zesilovač. Na dané optické trase s daným optickým zesilovačem se analyzuje přijatá výkonová úroveň, Q-faktor a chybovost BER. Na konci praktické části je provedeno vyhodnocení analyzovaných parametrů.

1. Popis optických sítí

1.1. Uspořádání optické přístupové sítě

Mezi základní funkční celky optické přístupové sítě patří:

- **Optické linkové zakončení - OLT (Optical Line Termination)** - jedná se o koncové zařízení na straně poskytovatele, které zajišťuje rozhraní mezi sítí přístupovou a sítí zajišťující telekomunikační služby
- **Optická distribuční síť - ODN (Optical Distribution Network)** - představuje soubor všech optických přenosových prostředků mezi OLT a ONU (ONT). Můžeme zde zařadit optické vlákno, aktivní a pasivní filtry, optické zesilovače, regenerátory, konektory a spojky.
- **Optická koncová jednotka - ONU (Optical Network Unit)** - zahrnuje obecné koncové zařízení na straně zákazníka. Zprostředkovává funkce rozhraní mezi optickou a metalickou částí, případně bezdrátovou částí přístupových sítí.
- **Optické síťové zakončení - ONT (Optical Network Termination)** - jedná se o koncové zařízení na straně zákazníka, které zprostředkovává funkce mezi zařízeními účastníků a přístupovou sítí (VoIP, video, data) [1].



Obr. 1.1: Schéma optické přístupové sítě [1].

Dále optické přístupové sítě rozlišujeme podle toho, ve které části optické sítě je optické vlákno ukončeno - umístění ukončujících jednotek ONU v přístupové sítí. Rozlišujeme tyto základní typy optických přístupových sítí:

- **FTTC (Fiber To The Curb)** - optické vlákno je přivedeno k uživatelskému rozvaděči, k němuž jsou připojeny uživatelské koncové jednotky metalickými kabely. Oproti FTTB jsou FTTC navrhovány pro volné prostranství, což také znamená vyšší požadavky na klimatickou odolnost.
- **FTTB (Fiber To The Building)** - optické vlákno je přivedeno do budovy uživatelů, jednotliví uživatelé jsou pak připojeni pomocí vnitřní sítě.
- **FTTO (Fiber To The Office)** - optické vlákno je přivedeno až do místností uživatelů. Jsou zde nároky na vysokou přenosovou rychlost.
- **FTTH (Fiber To The Home)** - optické vlákno je přivedeno až do uživatelských zásuvek.

- **FTTN (Fiber To The Node)** - připojení optického vlákna do datového uzlu Kabinet, ke kterému jsou připojeny jednotlivé koncové uzly metalickými kabelem.
- **FTTD (Fiber To The Desk)** - optické vlákna jsou připojeny přímo do koncového zařízení (např. osobní počítač) [1].

1.2. Specifika přenosu optického signálu v přístupové síti

Důležitá vlastnost optických přístupových sítí je obousměrný (duplexní) režim. Signály v obou směrech mohou být v případě optických přístupových sítí přenášeny:

- **Simplexně s dělením SDM (Space Division Multiplexing)** - pro každý směr přenosu je použito jedno optické vlákno.
- **Duplexně s dělením WDM (Wavelength Division Multiplexing)** - přenos je uskutečněn v jednom vláknu. Pro dopředný a zpětný směr jsou použity různé vlnové délky
- **Duplexně s dělením FDM (Frequency Division Multiplexing)** - přenos je uskutečněn v jednom vláknu, v jedné oblasti vlnových délek. Dopředný a zpětný směr jsou odděleny kmitočtově [2].

Další důležitou vlastností optických přístupových sítí je jejich topologie, která je dána charakterem přenosových traktů, využívaných v distribuční infrastruktuře sítě, čili mezi ukončujícími jednotkami OLT a ONU:

- **Bod-bod - P2P (Point-To-Point)** - jedná se o přímé spojení OLT a ONU jednotky
- **Mnohabodové - P2MP (Point-To-Multipoint)** - zde můžeme zařadit např. pasivní přístupovou síť (WDM-PON) [1] [2]

Mnohabodová optická distribuční síť ODN umožňuje pomocí aktivních a pasivních rozbočovacích prvků, tzv. splitterů rozdělit (sloučit) signály, které vcházejí (vycházejí) do OLT nebo ONU jednotek. Podle provedení optických rozbočovačů, OLT a ONU jednotek rozlišujeme následující typy optických přístupových sítí:

- **Aktivní optická síť - AON (Active Optical Network)** - tento typ optické přístupové sítě využívá ve své infrastruktuře aktivní optické prvky, které vyžadují napájení elektrickým proudem. (zesilovače, aktivní odbočnice apod.).
- **Pasivní optická síť - PON (Passive Optical Network)** - tento typ optické přístupové sítě využívá ve své infrastruktuře pouze pasivních prvků [1].

1.3. Aktivní optická síť (AON)

Tyto optické sítě tvoří základ tzv. hybridních sítí, protože na optickou část sítě ve vyšší úrovni navazuje nižší úroveň, kterou tvoří další technologie (rádiové prostředky, CATV, xDSL). Oproti pasivní optické síti PON má aktivní optická síť AON výhodu v tom, že dokáže zajistit podstatně větší dosahy (překlenutelných vzdáleností mezi OLT a ONU) a použití větších dělicích poměrů v distribučních bodech (např. více koncových jednotek ONU). Z hlediska nákladu jsou však aktivní optické sítě dražší než pasivní optické sítě PON, protože vyžadují napájení aktivních síťových prvků, použitých v distribuční síti ODN.

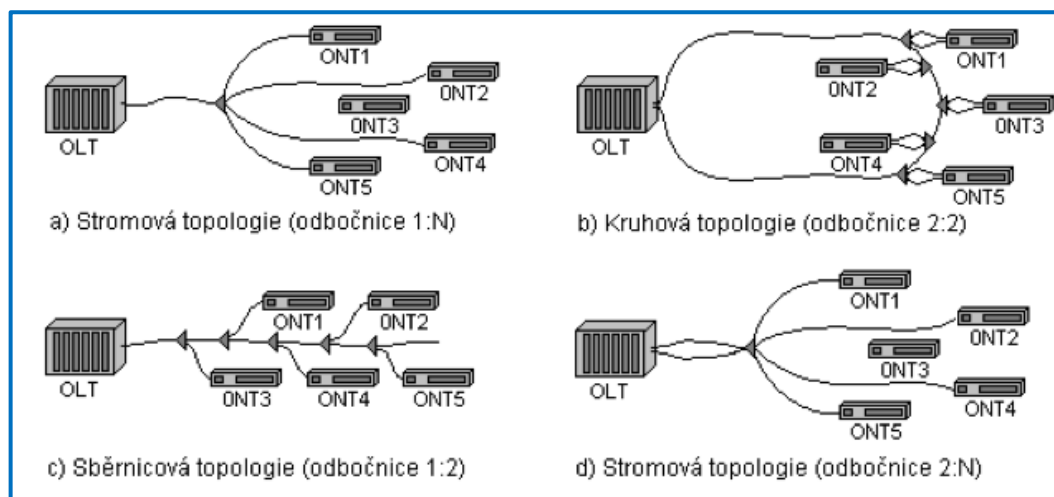
Aktivní optická síť AON bývá nejčastěji realizována technologií SDH. Pak je tvořena kruhem STM-1 nebo STM-4 se synchronními vydělovacími muldexy ADM (Add-drop muldex). K těmto muldexům jsou pak napojováni účastníci pomocí různých technologií (PON, ISDN, B-ISDN, HDLS, ASDL apod.) [2].

1.4. Pasivní optická síť (PON)

Pasivní optická síť PON využívá ve své distribuční části pasivních optických komponentů (optická vlákna, konektory, pasivní odbočnice). Pasivní odbočnice, AWG splitters nebo rozbočovače zatím umožňují rozdělit kapacitu maximálně pro 128 uživatelů, pracujících v obou směrech. Nevýhodou pasivních optických sítí je fakt, že k rozbočení optického signálu dochází bez jakýchkoliv úprav (regenerace, zesílení signálu). Díky tomu se maximální vzdálenost mezi OLT a ONU jednotkami pohybuje okolo 20 km. Tudiž tato technologie je nejvíc využívána v metropolitních sítích, kde je maximální vzdálenost mezi OLT a ONU v řádech desítek km.

1.4.1. Topologie pasivní optické sítě (PON)

Distribuční infrastruktura pasivních optických sítí PON je realizována logickou topologií point-to-multipoint, kdy je optické vlákno sdíleno více uživateli, viz. obrázek 1.2. Nejčastěji se používají odbočnice 1:N, či 2:N, kdy je optický signál z OLT jednotky distribuován dvěma optickými vlákny (jedním jsou přenášeny data, druhým video signál). N symbolizuje počet ONU jednotek. Velikost N může být 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128. Nejčastěji se používá rozbočovací poměr 1:32, či 1:64 [1].



Obr. 1.2: Topologie pasivní optické sítě PON [1].

Výhody pasivních optických sítí PON:

- optické propojení OLT–ONU umožňuje nenákladné zvyšování přenosové kapacity, či zavádění nových služeb
- eliminace instalování aktivních optických prvků a s tím spojeného napájení těchto prvků
- díky charakteru všesměrového vysílání, lepší distribuce video signálu v sestupném směru

- menší množství konektorů a svarů
- vyšší spolehlivost (absence aktivních prvků)

Nevýhody pasivních optických sítí PON:

- složitější garance kvality služeb
- překlenovací vzdálenost mezi OLT a ONU pouze 20 km
- drahý rozbočovač pro 16, 32, 64 a 128 vláken
- menší množství konektorů a svarů
- omezená šířka přenosového kanálu
- ekonomicky se vyplatí pro výstavbu velkých lokalit s vysokou penetrací zákazníků

1.4.2. První optické přístupové sítě (APON, BPON)

V roce 1998 byla schválena organizací ITU-T specifikace G.983.1 APON (ATM based PON). Tento typ sítě využívá asymetrického přenosu - buněk ATM (Asynchronous Transfer Mode). Přenosové rychlosti jsou nabízeny ve dvou variantách:

- symetrická služba o rychlosti $155,52 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$
- asymetrická služba o rychlosti pro směr downlink $622,08 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a pro směr uplink $155,52 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$.

Dodatečně byl tento standart doplněn o symetrickou rychlost v obou směrech $622,08 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$.

V roce 2001 byla přijata specifikace G.983.3 BPON (Broadband PON). Tato specifikace je rozšířením APON a využívá stejných služeb a přenosových rychlostí. Obě specifikace podporují přenos dat, hlasu a RF videa [1].

1.4.3. GPON

V roce 2003 byla organizací ITU-T schválena další specifikace G.984.1 GPON (Gigabit Capable PON). Především rozšiřuje specifikaci G.983.1, avšak kromě ATM buněk využívá také metodu GEM (GPON Encapsulation Method) -jedná se o zapouzdřování dat do speciálních GPON rámců. ATM buňky a GEM rámce jsou přenášeny společně v rámcích s pevnou délkou 125 μs . Díky použití GEM rámců lze využívat paketově orientované služby (Ethernet, IP protokol).

Optické sítě GPON se rozdělují do 3 tříd podle výkonů optických vysílačů a detektorů:

- **Třída A** - krátké vzdálenosti - použití v lokálních sítích s malým počtem uživatelů. Pro nízkou hodnotu překlenutelného útlumu již není moc využívána.
- **Třída B** - střední vzdálenosti.
- **Třída B+** - mezi třídou B a C. Využívá nové dostupné prvky pro navýšení překlenutelného útlumu
- **Třída C** - velké vzdálenosti. Možnost překlenutí tras s vysokým útlumem.
- **Třída C+** - oproti třídě C zvyšuje hodnoty překlenutelného útlumu o 2 dB.

Přenosové rychlosti jsou opět nabízeny ve dvou variantách:

- symetrická služba o rychlosti $1,24416 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ nebo $2,48832 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$.
- asymetrická služba o rychlosti pro směr downlink $1,24416 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$, $2,48832 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a pro směr uplink $1,24416 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a pro směr uplink $155,52 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, $622,08 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, $1,24416 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$.

Technologie GPON podporuje kromě přenos dat, hlasu a RF videa také technologii IPTV [1].

1.4.4. EPON

Příjetím specifikace IEEE 802.3ah zajistila organizace IEEE zavedení Ethernetu do přístupových sítí. Jedná se o nejrozšířenější technologii v oblasti přístupových sítí. Cílem bylo zavést Ethernet až k uživateli a tím zjednodušit navazování jednotlivých lokálních sítí. Oproti předchozím technologiím využívá EPON Ethernet rámce. Je navržena pro mnohabodovou síť, ale možno taky nasadit v jednobodové síti. Standardem 802.3ah EPON jsou definovány 2 typy rozhraní, které se liší výkony a dynamikou:

- **1000Base-PX10** - určen na optické trasy s maximální vzdáleností 10 km a rozbočovacím poměrem 1:16
- **1000Base-PX20** - určen na optické trasy s maximální vzdáleností 20 km a rozbočovacím poměrem 1:32

Přenosová rychlost dosahuje $1,24416 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ v obou směrech. Rovněž podporuje stejně služby jako technologie GPON [1].

1.4.5. 10-GEPON

Tato technologie je nástupcem předcházející technologie EPON. Tuto technologii definuje specifikace IEEE 802.3av. Oproti původní generaci EPON přináší jisté změny (sdílená přenosová rychlost, útlumové třídy, použité vlnové délky, zabezpečení). Zároveň je však kompatibilní s EPON. Hodnoty rozbočovacích poměrů jsou stejné jako u technologie EPON. Přenosové rychlosti jsou opět nabízeny ve dvou variantách:

- symetrická služba o rychlosti $10,3125 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$
- asymetrická služba o rychlosti pro směr downlink $10,3125 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a pro směr uplink $1,24416 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$

Symetrické třídy nesou označení PR (PR10, PR20 a PR30), zatímco asymetrické PRX (shodně tedy PRX10, PRX20 a PRX30). Asymetrická varianta byla vytvořena s ohledem na úsporu nákladů. Velkou výhodou této technologie je možnost kombinace symetrického a asymetrického přenosu pro jednotlivé OLT/ONU jednotky [3].

1.4.6. XG-PON

Stejně jako technologie EPON měla nástupce 10-GEPON, tak technologie GPON má nástupce XG-PON, který je definován specifikací G.987. XG-PON obsahuje zapouzdřování protokolů XGEM, který vychází ze staršího GEM. Počet adresovaných OLT/ONU jednotek se zvýšil na 256.

Současně s novou variantou XG-PON byla vypracována i koncepce navazujících pasivních optických sítí, které tak byly rozděleny do dvou směrů – NGA1 (Next Generation Access 1) a NGA2 (Next Generation Access 2). Technologie XG-PON spadá do generace NGA1, která se snaží udržet kompatibilitu se staršími verzemi (GPON). Zatímco koncepce NGA2 se snaží využít vlnový multiplex (CWDM, DWDM). Přenosová rychlost u této koncepce může dosahovat až $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$

Přenosová rychlost u XG-PON byla nadefinována asymetricky ve směru downlink na $9,95328 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a ve směru uplink $2,48832 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ [3].

	APON/BPON	GPON	EPON	10-GEPON	XG-PON
doporučení	ITU-T G.983.1	ITU-T G.984	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	ITU-T G.987
přenosové rychlosti	155,52 Mbit · s ⁻¹ sym.	1,24416 Gbit · s ⁻¹ sym.	1,24416 Gbit · s ⁻¹ symetricky	10,3125 Gbit · s ⁻¹ sym	9,95328/2,48832 Gbit · s ⁻¹
	155,52/622,08 Mbit · s ⁻¹	2,2,48832/1,24416 Gbit · s ⁻¹		10,3125/1,24416 Gbit · s ⁻¹	
	622,08 Mbit · s ⁻¹ sym.	2,48832 Gbit · s ⁻¹ sym.			
Vlnové délky [nm]	vzestupný směr 1260-1360	vzestupný směr nově 1290-1330	vzestupný směr 1260-1360	vzestupný směr 1260-1280 nebo 1260-1360	vzestupný směr 1260-1280
	sestupný směr 1480-1500	sestupný směr 1480-1500	sestupný směr 1480-1500	sestupný směr 1575-1580	sestupný směr 1575-1580
dosah [km]	< 20	< 20	< 10, < 20	< 10, < 20	< 20 (perspektivně < 40)
max. rozbočovací poměr	1:32	1:64 (proprietárně 1:128)	1:16, 1:32	1:16, 1:32 (zvažovány vyšší 1:64, 1:128)	1:256
útlumové třídy	-	třída A	PX10	PR10, PRX10	třída Nominal 1
		třída B (B+)	PX20	PR20, PRX20	třída Extended 1
		třída C (C+)		PR30, PRX30	třída Extended2

Tab. 1: Porovnání základních vlastností variant APON/BPON, GPON, EPON, 10-GEPON, XGPON [3].

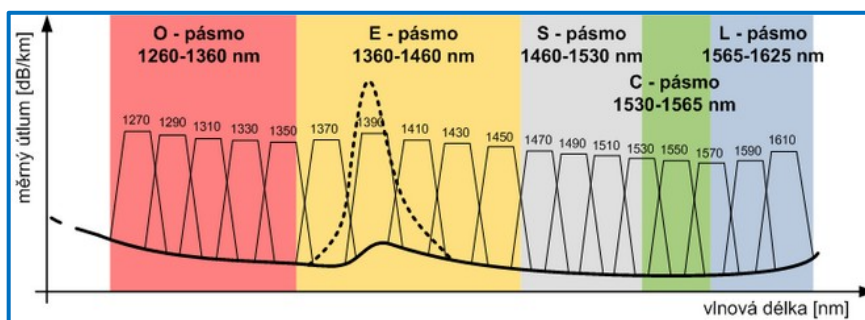
1.4.7. WDM-PON

Tato technologie je založena na technologii vlnového multiplexu - umožňuje po jednom optickém vlákně přenášet více vlnových délek (přenosových kanálů) a tím znásobit jeho kapacitu. Tato technologie byla navržena začátkem 70. let a postupně došlo díky standardizaci ITU-T k určení vlnových délek pro realizaci vlnového multiplexu a také došlo k rozdělení na variantu hrubého multiplexu CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex), který je definován standardem ITU-T G.694.2 a hustého multiplexu DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex), který je definován standardem ITU-T G.694.1. Někdy se také používá technologie WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex).

CWDM

Pro hrubé dělení vlnových délek byly definovány kanály s první nosnou 1270 nm a poslední nosnou 1610 nm. Odstup mezi jednotlivými nosnými byl 20 nm s tolerancí $\pm 6,5$ nm. Technologie CWDM tudíž používá 18 nosných. Díky většímu odstupu mezi kanály lze použít méně kvalitní optické přístroje a z toho vyplývá i menší cena oproti technologii DWDM. Na obrázku 1.3 jsou jednotlivé nosné rozděleny do následujících pásem:

- **O - pásmo (Original)** - vlnové délky 1260-1360 nm, nosné číslo 1-5
- **E - pásmo (Extended)** - vlnové délky 1360-1460 nm, nosné číslo 6-10 (počítá se s optickým vláknem s potlačenými ionty OH^- , v obr. 1 naznačeno čárkovaně)
- **S - pásmo (Short)** - vlnové délky 1460-1530 nm, nosné číslo 11-14
- **C - pásmo (Conventional)** - vlnové délky 1530-1565 nm, nosná číslo 15
- **L - pásmo (Long)** - vlnové délky 1565-1625 nm, nosné číslo 16-18



Obr. 1.3: Kanály definované dle normy ITU-T G.694.2 [4].

DWDM

Technologie DWDM používá podstatně menší rozteče mezi jednotlivými kanály než CWDM. Díky tomu lze do jednoho pásma umístit více přenosových kanálů a tím znásobit přenosovou rychlost. Avšak tato technologie vyžaduje přesné optické součástky (např. aktivně chlazené lasery) a díky tomu je vyšší i cena této technologie oproti CWDM.

Pro využití v pasivních optických přístupových sítích se pro použití vlnového dělení DWDM uvažuje o pásmech C a L s roztečí jednotlivých nosných cca 0,8 nm, což by umožnilo přenos 32 až 80 vlnových délek. Pro dálkové a páteřní optické spoje pak pásma C, L a S s roztečí nosných cca 0,4 nm

a použitím 80 až 160 nosných v jednom vlákne. Existují ale již teoretické studie pro zavedení ultra jemného vlnového dělení UDWDM (Ultra-Dense WDM).

WWDM

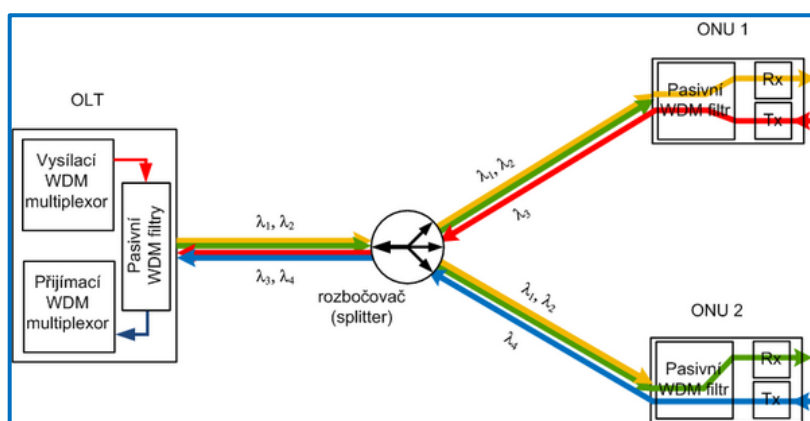
V některých případech se můžeme setkat s širokým vlnovým dělením. Jedná se o nejstarší technologii, která se vyznačuje nižší cenou oproti CWDM a DWDM. Používají se jak jednovidové, tak mnohavidové vlákna. U obou vláken lze použít až 4 vlnové délky.

Varianty WDM-PON

První varianta WDM-PON počítá pouze s pevně přidělenými vlnovými délkami individuálně všem koncovým jednotkám ONU/ONT. Pasivní rozbočovač provede pouze rozdělení optického signálu do všech odchozích směrů, každá koncová jednotka tedy obdrží optický signál na všech vlnových délkách a pomocí pevně nastaveného vlnového filtru vydělí svou určenou nosnou vlnovou délku.

Ve vzestupném směru bude mít každá koncová jednotka přidělenou svou individuální vysílací vlnovou délku, na které bude odesílat odchozí datové toky. Z hlediska architektury sítě se tak vlastně jedná o soubor přípojek typu bod-bod.

Nevýhody tohoto řešení vyplývají z obdobných problémů současných PON sítí – v sestupném směru jsou všechny vlnové délky šířeny všem koncovým jednotkám, je proto nutné zajistit šifrování příspěvků v sestupném směru pro zabránění jejich případného odposlechu. Výhodou pasivního rozbočovače je jeho jednoduchost a cena, nevýhodou je však jeho vysoký vložný útlum, který bude výrazně limitovat počet připojených koncových jednotek. Dále nemohou být v takovéto síti současně připojeny dvě jednotky komunikující na stejných vlnových délkách, pevné přiřazení vlnových délek také znamená nevhodné nakládání s přenosovými kapacitami, kdy pevně vyhrazená vlnová délka nemůže být podle potřeby nabídnuta jiné jednotce, která by pro svou potřebu v daném okamžiku vyžadovala zvýšenou přenosovou kapacitu.

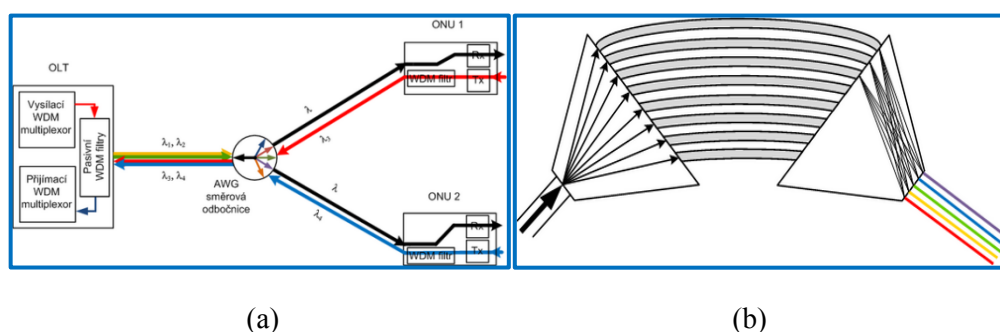


Obr. 1.4: WDM-PON s pevně přiřazenými vlnovými délkami [4].

Jako druhá možnost se nabízí využit směrových odbočnic na bázi vydělování vlnových délek pomocí metody AWG (Arrayed Waveguide Grating). V sestupném směru ze strany jednotky OLT přichází opět optický signál ve formě vlnového multiplexu nosných pro jednotlivé koncové jednotky ONU/ONT. Pomocí AWG směrové odbočnice jsou vyděleny jednotlivé vlnové délky do určených

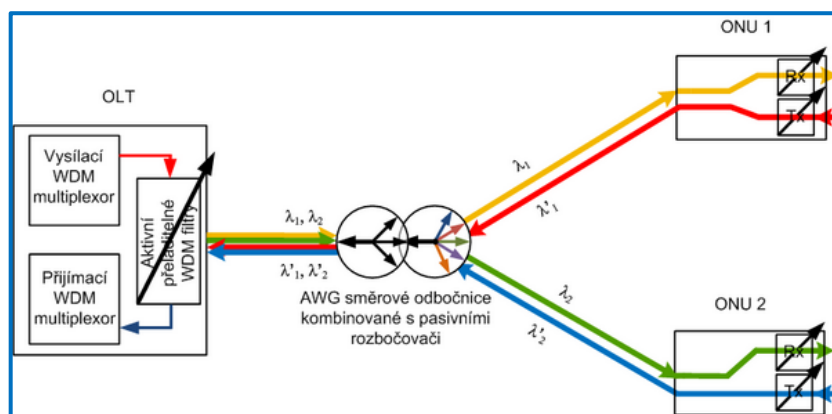
směrů a ke koncovým jednotkám se dále šíří nosné v sestupném směru v separátních vláknech na téže vlnové délce. Ve vzestupném směru zůstává princip stejný jako v prvním případě, každá koncová jednotka ONU/ONT vysílá svá data na jí vyhrazené vlnové délce.

Metoda AWG umožňuje jednoduše pasivně vydělovat přenášené vlnové délky a odbočovat je rovnoměrně do všech výstupů ve formě jednotné vlnově přeložené nosné. Oproti pasivnímu rozbočovači v prvním případě přináší AWG směrová odbočnice zejména snížení vložného útlumu, typická hodnota útlumu se pohybuje kolem 5 dB nezávisle na počtu odchozích směrů a použitých vlnových délek. Další výhodou této varianty je odstranění pasivního WDM filtru na vstupu koncové jednotky, což má za následek rovněž snížení celkového útlumu.



Obr. 1.5: (a) WDM-PON s využitím směrové odbočnice typu AWG .
(b) Princip de/multiplexace vlnových délek pomocí metody AWG [4].

Třetí způsob realizace WDM-PON využívá kaskádního zapojení. Jedná se o kombinace AWG směrových odbočnic a pasivních optických rozbočovačů, kdy budou k jednotlivým výstupům optického rozbočovače zapojeny AWG odbočnice, případně několik odbočnic kaskádně. Použitím N AWG odbočnic se dosáhne jednak větší přesnosti při vydělování jednotlivých vlnových délek, což může být předpoklad k použití hustého vlnového multiplexu DWDM a dále vede v kombinaci s přeladitelnými filtry v optických jednotkách k návrhu univerzálního síťového plánu optických kanálů. Použití univerzálních koncových jednotek a volitelných vlnových délek navíc umožňuje přidělovat kanály jednotkám na základě aktuální potřeby a požadavků. Tento mechanismus se označuje také jako DWA (Dynamic Wavelength Assignment) a odpovídá dynamickému přidělování přenosových kapacit v sítích s časovým dělením – DBA.



Obr. 1.6: Kaskádní zapojení AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů [4].

1.5. Metropolitní síť

Metropolitní síť může být rozdělena do dvou částí. První část metropolitní sítě je přístupová síť, která vede od centrální ústředny na straně poskytovatele (OLT) až k místu, na kterém se nachází zákazník. Druhá část metropolitní sítě propojuje jednotlivé centrální ústředny mezi sebou. Přístupovou síť v dnešní době tvoří prstencové topologie, které mohou mít v průměru až několik desítek kilometrů. Také síť, která propojuje jednotlivé ústředny může dosahovat několika desítek kilometrů.

Z důvodů krátkých vzdáleností se zdá nasazení WDM sítě jako málo přesvědčivé. Alternativou může být použití více vláken nebo vysokorychlostních TDM sítí.

Na druhou stranu, kromě zvyšování přenosové kapacity se zde objevují požadavky na podporu jiných služeb - poskytovatelé potřebují nabídnout různé typy připojení pro svoje zákazníky (IP, Ethernet, Gigabit Ethernet, Fibre Channel). Metropolitní síť také musí podporovat velké množství protokolů a služeb. Ve většině případů jsou tyto služby zajištěny sadou překryvných sítí, z nichž každá je specializována na určitou službu. Tyto překryvné sítě jsou v ideální případě realizovány pomocí jedné infrastruktury - WDM sítě.

Dalším faktorem je skutečnost, že přenosové rychlosti se mění častěji v metropolitních sítích než v dálkových sítích. To zvyšuje potřebu často a efektivně přerozdělovat přenosovou kapacitu tam, kde je potřebná. Tento požadavek splňují WDM sítě, které umožňují účinně rozdělovat přenosovou kapacitu.

Velké využití najdou WDM sítě u velkých podniků, které potřebují propojit svoje datové centra vysokorychlostními linkami. Tyto datové centra jsou od sebe vzdáleny několik kilometrů (případně desítek kilometrů) a jsou zrcadlená (např. jedno datové centrum slouží jako hlavní a druhé slouží jako záloha). Díky tomu jsou podniky chráněny proti výpadkům (pokud některé datové centrum selže). Důvodů, proč umisťovat jednotlivé datové centra v různých lokacích, je hned několik:

- cena - zařízení mohou být umístěny na místech, kde jejich provoz bude nejlevnější
- záloha - pokud by hlavní datové centrum postihla nějaká katastrofa (např. požár), záložního datové centrum, které se nachází o několik kilometrů dál by mohlo fungovat dál bez potíží

Vzhledem k charakteru provozu a použitým vysokým rychlostem je snahou nasazovat více WDM topologie s optickými add/drop multiplexory, než vysokorychlostní TDM topologie. Díky tomu je však nutné počítat vyšším útlumem na optické trase a tudíž s nutností nasadit optické zesilovače. Důvody nasazení optických zesilovačů v metropolitních sítích jsou následující:

- i když vzdálenosti v těchto sítích jsou v řádech několika kilometrů, optická trasa může obsahovat staré optické vlákna s vyšším měrným útlumem, či velké množství optických konektorů nebo svarů, které také zvyšují ztrátovost sítě. Díky tomu může mít 10 km optická linka mít ztrátu až 10 dB
- útlum na optické trase způsobují také optické add/drop multiplexory (v řádech několika dB) [5]

2. Optické zesilovače

2.1. Vlastnosti a výhody optických zesilovačů

Základní optická přenosová trasa se skládá z vysílače, přijímače a optického vlákna.. Jak již bylo v úvodu zmíněno, optický signál je třeba po 80–100 km znovu zesílit a vyčistit. K tomu se může použít optický zesilovač nebo nějaké elektro-optické zařízení - regenerátor.

U tradičních regenerátorů je třeba převádět signál na elektrický, který je vyčištěn, zesílen a poté převeden zpět na optický. Takové řešení bylo nevhodné pro vysokorychlostní přenosové signály z důvodu pomalé odezvy elektroniky, která nestačí zpracovat rychlý optický signál. Kromě samotné existence takovýchto zařízení (vyžadující mj. napájení, vhodné umístění atd.) byla jejich největší nevýhodou nutnost konverze signálu mezi optickou a elektronickou podobou. Navíc tyto "regenerační" zesilovače jsou závislé na počtu kanálů, použité modulaci a protokolu. Také každá změna na přenosové trase by znamenala vyměnit regenerátory na této trase. Proto bylo nutno hledat řešení v podobě optických zesilovačů, které konverzi zcela opomíjejí.

Optický zesilovač je zařízení, které zesiluje přímo optický signál v optické doméně a nepotřebuje ho převádět na elektrický signál pro potřeby obnovy a zpět na optický. Princip zesilovače je založen na existenci stimulované emise záření v materiálu a vyžaduje optické čerpání energie. Stimulovaná emise je jev, při kterém foton s frekvencí dopadá na atom (resp. molekulu) ve vyšším energetickém stavu a přiměje ho k přechodu do nižšího stavu za vyzáření dalšího fotonu. Původní foton se přitom nepohlí a oba fotony se pohybují společně dále stejným směrem, jako foton, který emisi vyvolal. Jsou synchronizovány, mají stejnou frekvenci a stejnou fázi. Jedná se tedy o koherentní záření (koherentní vlnění). Záření se tak zesiluje a proces se může lavinovitě opakovat s dalšími atomy (resp. molekulami). Díky tomu optické zesilovače nejsou závislé na použité modulaci, počtu kanálů a protokolu. Optický zesilovač může nahradit všechny komponenty, které je potřeba nasadit při použití regenerátoru [6].

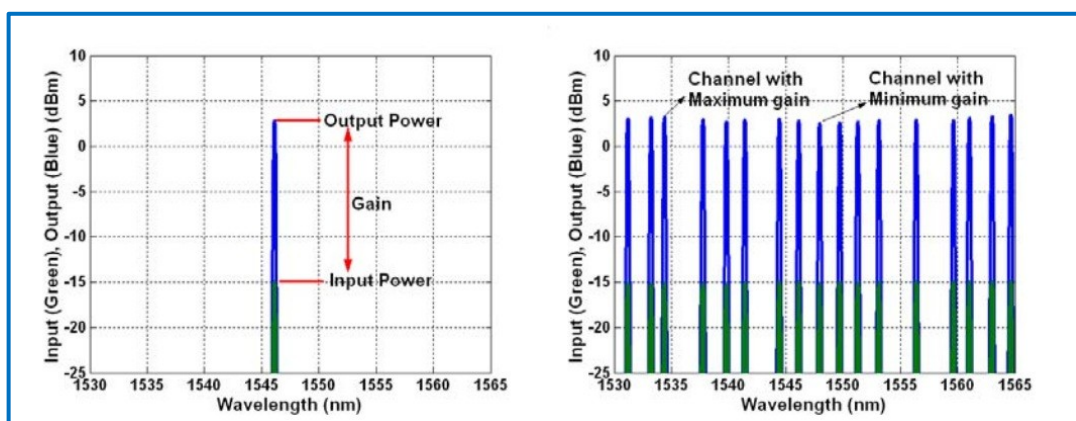
2.2. Zesílení, vstupní a výstupní výkon optického zesilovače

Základní vlastností optického zesilovače je jeho zesílení, což je množství, o které je vstupní optický signál zesílen. Zesílení se měří v decibelech [dB]. Zesílení optických zesilovačů se pohybuje v rozsahu 10-50 dB. Zesílení 10 dB znamená, že signál je zesílen 10 krát, zatímco u zesílení 30 dB je signál zesílen 1000 krát.

Některé optické zesilovače jsou určeny pro zesílení určité úrovně na vstupu a jiné mohou zesilovat více různých vstupních úrovní. Kromě toho, klíčová vlastnost optických zesilovačů je jejich výstupní výkon. Tento parametr je rozhodující při určování pořizovacích nákladů zesilovačů.

Obecně řečeno, optické zesilovače mohou být klasifikovány jako jednodanálové nebo vícekanálové (WDM). Jejich název napovídá, že jednodanálové zesilovače jsou určeny pro zesílení jednoho optického kanálu, který může být kdekoliv v určeném pásmu, jako je například C-pásmo. Jednodanálové zesilovače obvykle pracují v širokém rozsahu provozních zisků. Na levé straně obrázku 2.1 je vidět spektrum zesilovače jednoho kanálu.

Naproti tomu, WDM zesilovače jsou určeny pro zesílení libovolného počtu kanálů (ve stanoveném pásmu). U WDM zesilovačů je důležité, aby všechny kanály měly rovnoměrný zisk. Na pravé straně obrázku 2.1 je vidět spektrum zesilovače více kanálů. Jestliže každý kanál má po zesílení jinou výstupní úroveň a na lince se nachází více zesilovačů, mohou se tyto rozdíly hromadit a vést k chybám mezi kanály na konci linky. V rámci zachování rovnoměrného zesílení na všech kanálech, podporují WDM zesilovače jede provozní zisk, nebo úzké pásmo zisků. Tyto zesilovače jsou také konstrukčně náročnější.



Obr. 2.1: Příklad vstupních (zelené) a výstupních (modré) spekter jednokanálového (vlevo) a WDM vícekanálového (vpravo) zesilovače [6]

2.3. Nevýhody optických zesilovačů

I přes všechny vyjmenované výhody nejsou optické zesilovače ideálními zařízeními. Protože optické zesilovače jsou analogové zařízení optické trasy, přidávají k zesílení signálu tzv. nežádoucí optický signál (šum), zejména způsobený spontánní emisí ASE (Amplified Spontaneous Emission). ASE je širokopásmový signál, který se vyskytuje v rozsahu vlnových délek od 1450 do 1650 nm. Pokud se na optické trase používá více optických zesilovačů, šum se násobí a vede ke zvýšené chybovosti BER (Bit Error Rate). Mezi další nevýhody se může zařadit nerovnoměrné zesílení různých vlnových délek. Ideální optický zesilovač by měl zesilovat každou vlnovou délku stejně při co nejnižším optickém šumu [6].

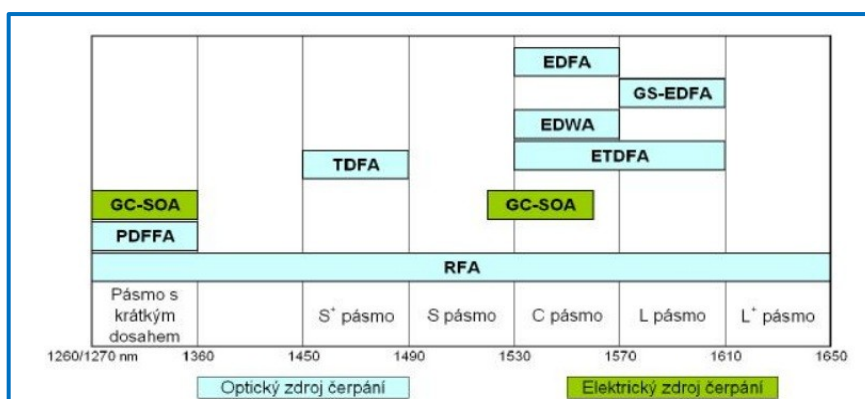
3. Rozdělení optických zesilovačů

3.1. Rozdělení podle typu optického čerpání

K tomu, aby zesilovač správně fungoval, je nutné dodat energii, například v podobě elektrického čerpání. Z toho plyne rozdělení optických zesilovačů do tří hlavních skupin:

- energie je dodána ve formě záření z pumpy s konkrétní vlnovou délkou - vláknové zesilovače s dotací xDFA (x Doped Fiber Amplifier), kde x je přípustný chemický prvek, např. Erbium, Thulium a další
- energie je dodána ve formě elektrického proudu (elektrickým polem) - polovodičové zesilovače SOA (Semiconductor Optical Amplifier)
- energie je generována jako postranní vid záření v úzkém pásmu kolem jiné vlnové délky vlivem Ramanova rozptylu - RA (Raman Amplifier)

Z principu funkce zesilovače vyplývají různé možnosti nasazení v optickém přenosovém systému, jelikož různé způsoby optického čerpání vedou k odlišným vlastnostem zesilovačů [7].

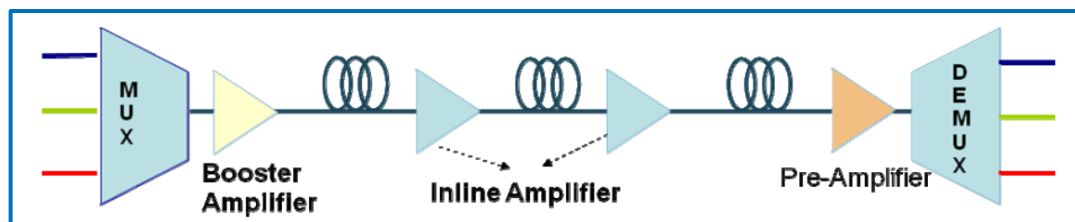


Obr 3.1: Rozdělení optických zesilovačů podle pracovní oblasti.

EDFA	Erbium doped fiber amplifier 1530-1570 nm
EDWA	Erbium doped waveguide amplifier 1530-1570 nm
ETDFA	Telluride based erbium doped fiber amplifier 1532-1608 nm
T DFA	Thulium doped fiber amplifier 1450-1490 nm
PDFFA	Praseodymium doped fluoride fiber amplifier 1260/1270-1360 nm
GS-EDFA	Gain shifted EDFA 1570-1610 nm
GC-SOA	Gain clamped semiconductor optical amplifier 1260/1270-1360 nm
RFA	Raman fiber amplifier

3.2. Rozdělení podle umístění zesilovače na optické trase

Optické zesilovače mohou být v rámci optické sítě použity jako boostery, in-line zesilovače (linkové zesilovače), nebo předzesilovače. Jak je naznačeno na obrázku 3.2, každý z těchto zesilovačů se vyznačuje jinými parametry.



Obr 3.2: Jednoduchá WDM optická síť, kde počet kanálů je spojen s použitím multiplexeru. Optický signál je multiplexován, zesílen boosterem, pak je poslán do vlákna, každých 30-50 km znovu zesílen a nakonec zesílen předzesilovačem a demultiplexován [6].

3.2.1. Booster

Tento zesilovač se umísťuje hned za vysílač na začátek optické trasy. Hlavním úkolem boosteru je zesílení optického signálu na maximální možnou úroveň, kterou lze do vlákna navázat. Důležitý je tedy maximální výkon a plochá charakteristika zesílení vlnový délek (zesilovač by měl zesílit stejně každý kanál). Protože zesilovač pracuje ze signály, které se vyznačují vysokým odstupem signálu od šumu, není důležitý parametr SNR.

3.2.2. In-line zesilovač

Tento zesilovač se umísťuje na optické trase. Jeho úkolem je kompenzovat útlum způsobený předchozí optickou trasou. Do optické trasy se nasazuje každých 30-50 km. Disponuje vysokým ziskem a vysokým saturačním výkonem. Důležité je také stejné zesílení každého kanálu a nízký šum pro bezchybný přenos.

3.2.3. Předzesilovač

Umísťuje se na konec optické trasy. Slouží k zesílení velice nízkých úrovní, aby je byl schopen detektor správně zpracovat. U tohoto zesilovače je kladen důraz na jeho minimální vnitřní šum, zisk nebo saturační výkon u tohoto zesilovače nejsou důležité [6] [8].

4. Vláknové zesilovače s dotací

4.1. Typy vláknových zesilovačů s dotací

Vláknové zesilovače jsou optické zesilovače, které pro zesílení používají dopované optické vlákno. Tento typ optického zesilovače vynalezl roku 1964 E. Snitzer, kdy předvedl neodýmiem dopovaný optický zesilovač pracující na 1060 nm. Vláknem mělo délku kolem jednoho metru a bylo omotáno kolem výbojky, která stimulovala ionty neodymia.

Signál, který má být zesílen a signál z laserové pumpy je multiplexován do vlákna s příměsí a je zesilován s dopovanými ionty. Spektrální závislost zisku zesilovače je silně závislá na dopovacím prvku. Pro zesilovací efekt se používá jeden z prvků vzácných zemin:

- Erbium (Er)
- Praseodymium (Pr) - pro vlnovou délku 1300 nm
- Ytterbium (Yt)
- Neodymium (Nd)
- Thulium (Tm) - pro pásmo 1450-1490 nm

Koncentrace příměsí se pohybuje v řádu od jednotek do stovek atomů na 1 milion molekul základního materiálu vlákna. Pro efektivní čerpání je nutno koncentrovat dotací do jádra vlákna. Koncentrace příměsí musí být optimální, přesycení jádra vede ke zhoršení zesilovacího účinku a snižuje zisk zesilovače. Jako dotace optického vlákna se nejčastěji používají ionty prvku Erbium [7].

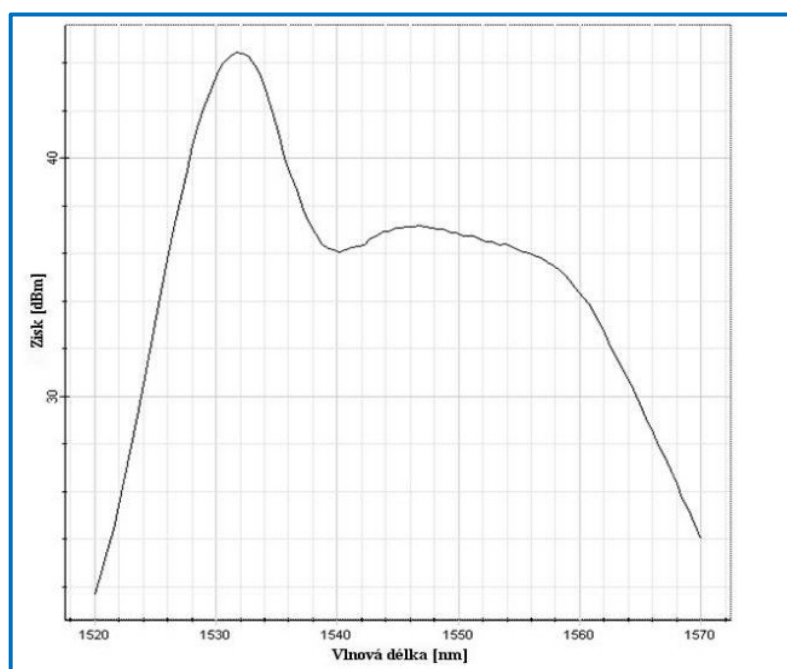
4.2. Vlastnosti vláknových zesilovačů s dotací

4.2.1. Zisk

Díky velké délce vlákna ve vláknových zesilovačích, můžeme i při mírném čerpacím výkonu dosahovat vysokého zisku v řádu desítek dB. Zisk roste s délkou vlákna až do určité maximální vzdálenosti. Po překročení této vzdálenosti začíná zisk klesat, protože je signál tlumen vláknem. To je způsobeno zeslabením záření z čerpacího laseru, které již není schopné uvést vlákno do stavu populační inverze. Dosažitelný zisk je většinou limitován hodnotou ASE (Amplified Spontaneous emission). Velikost šumu závisí na velikosti zisku a velikosti výkonu čerpacího zdroje.

Spektrum zisku u vláknových zesilovačů není rovnoměrné. Po průchodu několika zesilovači mohou rozdíly mezi úrovněmi jednotlivých signálů činit i několik dB. Zejména pro použití se systémy WDM je potřeba, aby se zisky jednotlivých kanálů od sebe příliš nelišily. Toho se dosahuje zapojením filtrů, které selektivně zeslabují signály s vysokým ziskem, a tím zplošťují celé spektrum.

Tvar spektra zisku pro zesilovač s erbiem dotovaným vláknem je vidět na obrázku 4.1. V oblasti kolem 1535 nm vykazuje nedopované vlákno značné ztráty, ale v případě velkého vybuzení také vysoký zisk. S rostoucí vlnovou délkou je k dosažení zisku zapotřebí menší excitační energie, ale hodnota maximálního dosažitelného zisku je také menší. Maximální zisk se dosahuje typicky v oblasti 1530–1560 nm s výraznou špičkou na 1530 nm [9].



Obr 4.1: Závislost zisku optického zesilovače na vlnové délce.

4.2.2. Saturační výkon

Saturační výkon je definován jako výstupní výkon, pro který hodnota zisku zesilovače klesne o 3 dB oproti nesaturované hodnotě. Původ saturace zisku leží ve snižování populační inverze stimulovanou emisí záření, kterou vyvolává procházející signál. Po dosažení určitého výkonu hodnota zisku klesá. Hodnota saturačního výkonu je důležitá při použití zesilovače jako boosteru (výkonového), kdy je žádoucí zesilovač s vysokým saturačním výkonem [8] [9].

4.2.3. Saturační charakteristika

V případě saturace zisku je chování vláknových zesilovačů velmi odlišné od těch polovodičových. Díky relativně malému příčnému řezu je saturační energie poměrně velká. V důsledku toho může být ve vláknovém zesilovači uloženo velké množství energie, která může být později uvolněna jedním krátkým pulsem. V případě pulsů s energií vyšší než je hodnota saturační energie, může docházet k jejich zkreslení [9].

4.2.4. ASE (Amplified Spontaneous Emission) a šum

Dosažitelná hodnota zisku u vláknových zesilovačů není většinou limitována výkonem čerpacího laseru, ale hodnotou ASE. ASE vzniká, když je do prostředí čerpána energie k dosažení populační inverze. Zesílená spontánní emise je vlastně světlo uvolněné při spontánní emisi a posléze opticky zesílené procesem stimulované emise záření. Protože vláknové zesilovače zesilují obousměrně, rozeznáváme také dopředný a zpětný ASE šum. Velikost tohoto šumu závisí na velikosti zisku a velikosti výkonu čerpacího zdroje.

4.3. EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovač

4.3.1. Vlastnosti EDFA

Z hlediska rovnoměrného zesílení, pořizovacích nákladů a výstupního výkonu pro WDM systémy je nejvhodnější vláknový zesilovač EDFA, jehož vlákno je dotováno vzácnou zeminou s ionty erbia E^{+3} . Hlavním úkolem EDFA zesilovače je rovnoměrně zesílit všechny kanály ve WDM systému, aniž by je převedl na elektrický a zpět. Ionty erbia pohlcují záření o vlnové délce 980 nm a generují záření kolem vlnové délky 1550 nm - jedná se o pásmo C+L. Na vstupu je tedy třeba mít laser, který pracuje na vlnové délce 980 nm.

Mezi požadavky pro EDFA zesilovač patří dostatečné zesílení, dobrá teplotní stabilita, malá hodnota šumu, vysoká spolehlivost a nízká cena.

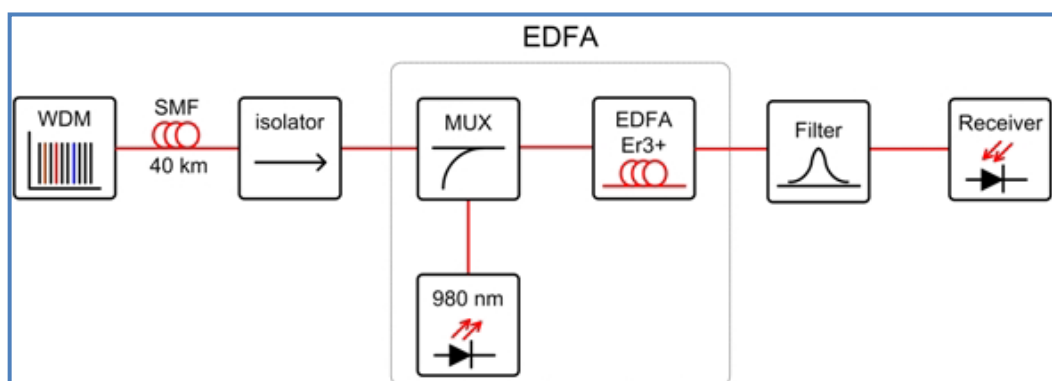
EDFA zesilovač se vyznačuje velkým zesílením (obvykle 30 až 50 dB), jednoduchostí konstrukce a spolehlivostí. Tento zesilovač je nejvhodnější použít jako linkový zesilovač, ale lze ho použít také jako booster. Není vhodné ho použít jako předzesilovač (díky vysokému šumu), pokud nepoužijeme speciální filtry, které dokážou šum eliminovat. Aby EDFA zesilovač dokázal rovnoměrně zesílit každý kanál u WDM systému, je třeba použít speciální mřížky s dlouhou periodou.

Při použití jednovidového vlákna v oblasti kolem 1550 nm lze dosáhnout s EDFA zesilovačem přenosové rychlosti okolo $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ na 600 km. Při použití vlnové délky kolem 1550 nm nám brání dosahovat velkých přenosových rychlostí tzv. chromatická disperze. Jedná se o jev, který je způsoben rozdílným indexem lomu daného jádra pro různé vlnové délky a tím odlišnou rychlostí světla s různou vlnovou délkou. Při použití různých kompenzačních technik chromatické disperze je možno dosáhnout přenosové rychlosti okolo $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$

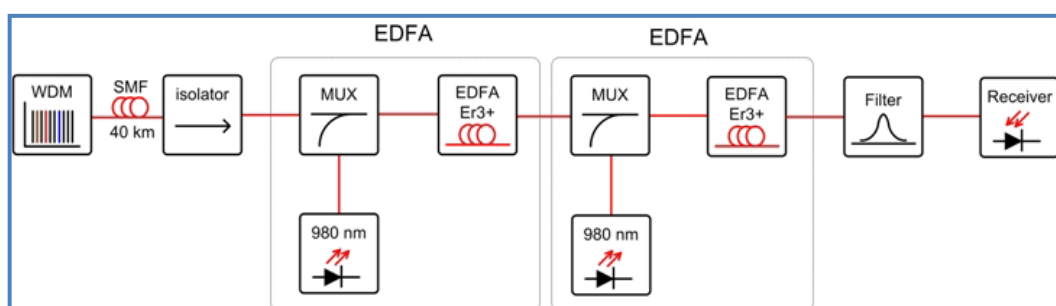
4.3.2. Popis a schéma EDFA zesilovače

Optické zesilovače pracují na principu stimulované emise záření pro zesílení vstupního optického signálu. Tento princip fungování se velice podobá principu laserů. Aby tento účel generování fungoval, je třeba připojit k zesilovači optické čerpání. U polovodičového zesilovače je tato energie dodávána elektrickým polem a u vláknových zesilovačů tuto energii dodáváme pomocí záření pumpy. Bohužel při zesilování užitečného signálu dochází také k zesílení šumu následkem spontánní emise ASE.

EDFA zesilovač je tvořen laserovým zdrojem záření, který pracuje na vlnové délce 980 nm. Jedná o laserovou pumpu. Dále je v tomto zesilovači speciální optické vlákno dopované Erbiem. Díky záření z laserové pumpy se generovaný zisk nachází v C pásmu. EDFA zesilovače používají speciální optický izolátor, pro zamezení zpětného šíření záření, aby nedošlo k poškození laserů. Grafické schéma EDFA zesilovače je zobrazeno na obrázku 4.2. V praxi se často používá kaskádové zapojení EDFA zesilovačů s cílem vyššího zisku. Příklad kaskádového zapojení je na obrázku 4.3 [7].



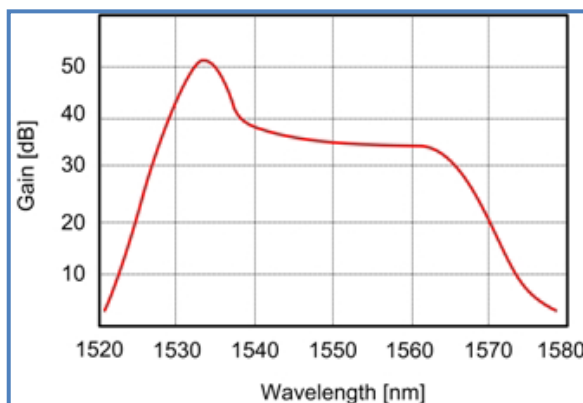
Obr 4.2: blokové schéma EDFA zesilovače [7].



Obr 4.3: kaskádové zapojení EDFA zesilovače [7].

4.3.3. Zisk EDFA zesilovače

EDFA zesilovače se používají ve dvou pásmech - konvenční pásmo C (1530-1565 nm) a dlouhé pásmo L (1570-1610 nm). Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma pásmy je ten, že u pásma L se používá delší dopované vlákno. Tyto zesilovače umí zesílit signál až o 50 dB v pásmu C+L. Ostatní dotované zesilovače dokážou zesílit signál o podobnou hodnotou, ale pracují v jiných pásmech (obvykle v pásmu O nebo E). Typicky jsou EDFA zesilovače doplněné filtrem, který zajišťuje zploštění křivky zisku v C pásmu, která nabývá maxima okolo 1530 nm. Jako filtr se používá již dříve zmíněná mřížka s dlouhou periodou - pouze při zesilování více vlnových délek (WDM systémy). U zesílení jedné vlnové délky se tento filtr nepoužívá.



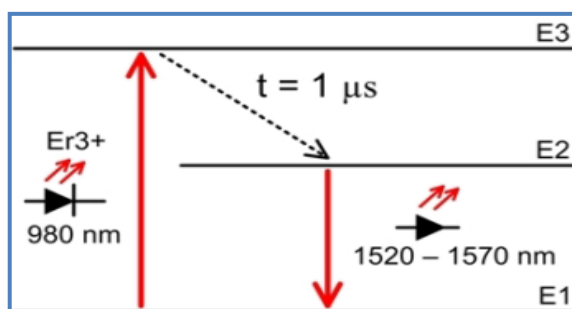
Obr 4.4: zesílení EDFA zesilovače v pásmu C a L [7].

4.3.4. Laserové pumpy v EDFA

V EDFA zesilovačích se používají laserové pumpy, které pracují na vlnové délce 980 nm nebo 1480 nm. Vlnová délka 1480 nm se používá z historických důvodů proto, že tyto lasery dosahovaly vysokých výkonů (od 200mW do 400mW), měly malé pořizovací náklady a vysokou spolehlivost. Laserovou pumpu si můžeme dovolit zapojit jak dopředným tak v zpětném směru[7].

4.3.5. Princip fungování EDFA zesilovače

Při záření z laserové pumpy (o vlnové délce 980 nm nebo 1480 nm) do speciálního vlákna dlouhého několik metrů (obvykle 10 metrů) dochází k excitaci atomů dopovaného prvku, v tomto případě iontů Erbium Er^{3+} . Pohlcená energie umožňuje přechod na vyšší energetickou hladinu E3. V tomto stavu setrvávají ionty krátkou dobu (řádově několik milisekund). Potom následuje nezářivý přechod na hladinu E2 ve vodivostním pásu. Jakmile se dosáhne stavu inverze populace, kdy většina iontů Erbium se nachází v excitovaném stavu, dochází k uvolnění energie vlivem přítomnosti přenášeného signálu. Následuje návrat excitovaných iontů na základní energetickou hladinu E1 ve valenčním pásu, doprovázenou stimulovanou emisí záření o shodné vlnové délce a fázi s přenášeným signálem. Tak je v nich dočasně uložena energie získaná ze záření laserové pumpy.



Obr 4.5: excitace atomu Erbium v důsledku čerpání a záření na vlnové délce 1550 [7].

4.3.6. Výhody EDFA zesilovače

- vysoký zisk (30-50 dB)
- signál se nepřevádí na elektrický a pak zpět na optický
- široký rozsah vlnových délek (kolem 30 nm)
- nižší výkon čerpacího zdroje
- dobrý převod výkonu pumpy na zesílení
- pasivní prvek - při odpojení EDFA zesilovače od čerpání se nerozpojí optická síť
- není citlivý na polarizaci vstupního světla

4.3.7. Nevýhody EDFA zesilovače

- při použití u WDM systémů nezesiluje rovnoměrně každou vlnovou délku - je třeba použít filtry
- vhodný především pro pásmo C a L, pro ostatní pásma je nutné používat jiný typ zesilovače (s fluoridovým vláknem, Ramanův zesilovač)
- kromě užitečného signálu zesiluje také šum
- vhodnější pro zesílení diskrétních signálů
- problém se zmenšením velikosti zesilovače

4.4. Ostatní vláknové zesilovače - PDFA, TDFA, YDFA

4.4.1. PDFA zesilovač

Tento zesilovač pracuje na stejném principu jako EDFA zesilovač. Od EDFA zesilovače se odlišuje jiným dopovacím prvkem, kterým je Praseodymium Pr^{+3} . PDFA zesilovač se nejčastěji používá k zesílení signálů CATV v pásmu 1310 nm nebo k zesílení datových přenosových systémů. Tyto zesilovače pracují v pásmu O (1280-1320 nm). Experimentálně byla ověřena velká závislost PDFA zesilovače na vlnové délce vstupního signálu. Nejvyššího zesílení dosahuje zesilovač v okolí vlnové délky 1300 nm. Protože pracují na vlnové délce kolem 1300 nm, dosahují nízkých hodnot chromatické disperze. Díky tomu není třeba umísťovat na optické trase kompenzátory disperze, které navyšují náklady na dálkové přenosové trasy, jak je tomu u EDFA zesilovače. Oproti EDFA zesilovači pracuje PDFA zesilovač s menšími přenosovými rychlostmi, nicméně je vhodné ho nasadit tam, kde pracují zařízení na vlnových délkách okolo 1310 nm, případně náklady jsou menší, než na vlnových délkách kolem 1550 nm.

4.4.2. TDFA zesilovač

U TDFA zesilovače je použito fluoridové vlákno dopované Thuliem Tm^{+3} . Tento zesilovač pracuje v pásmu S (1460-1490 nm). Toto pásmo není příliš využíváno pro komerční použití, proto se tyto zesilovače používají o dost méně než EDFA zesilovače. Navíc fluoridová vlákna jsou náročnější na výrobu, jsou méně odolná vůči vnějším vlivům a nekompatibilní s běžnými optickými vlákny.

4.4.3. YDFA zesilovač

U YDFA zesilovače se používá jako dopovací prvek Yterbium Yt^{+3} . Tento zesilovač pracuje ve 3 různých pásmech:

- Standardní pásmo: 1055-1080 nm
- Dlouhé pásmo: 1055-1090 nm
- Krátké pásmo: 1035-1070 nm

YDFA zesilovač používá laserovou pumpu, která pracuje na vlnové délce 915 nm. Největší výhodou YDFA zesilovače je jeho velký výstupní výkon (+43 dB) a vysoký zisk (>30 dB) [10].

5. Polovodičové optické zesilovače (SOA)

5.1. Historický vývoj

Vynález polovodičového laseru v 60. letech umožnil větší rozvoj polovodičových optických zesilovačů. První polovodičové optické zesilovače byly založeny na GaAs homopřechodech pracujících v nízkých teplotách. V 70–80. letech proběhly další pokroky v návrhu a výrobě SOA. Na počátku se studie zaměřovaly na AlGaAs SOA pracující v pásmu okolo 830 nm, později se více začalo zaměřovat na InP/InGaAsP SOA pracujících v pásmech okolo 1300 nm a 1550 nm. Na konci 90. let se začaly vyrábět SOA s více symetrickým vlnovodem, čímž bylo dosaženo menší citlivosti na polarizaci. V dnešní době se jedná o spolehlivá, cenově dostupná zařízení, které je možno nasadit v optických komunikacích.

5.2. Princip fungování polovodičového optického zesilovače

Oproti EDFA zesilovači, kde je zisk generován v materiálu optického vlákna, je zisk u polovodičového zesilovače generován ve struktuře polovodiče. Polovodičovému zesilovači je třeba dodat energii formou budícího elektrického pole, tudíž čerpání není optické, jako u vláknových zesilovačů. Pro konstrukci polovodičového optického zesilovače se nejčastěji používají tyto materiály:

- GaAs - sloučenina Arsenidu a Galia
- AlGaAs - sloučenina Hliníku, Arsenidu a Galia
- InGaAs - sloučenina India, Arsenidu a Galia
- InGaAsP - sloučenina India, Arsenidu, Galia a Fosforu
- InAlGaAs - sloučenina India, Hliníku, Arsenidu a Galia
- InP - sloučenina India a Fosforu

Tyto prvky vynikají velmi dobrou kvantovou účinností, která zaručuje maximální počet generovaných fotonů vztážen k počtu excitovaných nosičů náboje.

Princip fungování je velice podobný práci stimulované emise fotonů, která je velice podobná principu fungování polovodičových laseru. Proces stimulované emise zahrnuje několik kroků:

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. stimulovaná absorpce | 4. stimulace dalších fotonů |
| 2. excitace media | 5. vznik zisku v mediu polovodiče |
| 3. dosažení inverze populace | 6. opuštění hrany čipu |

5.2.1. Excitace media

Excitace polovodičového media p-n přechodu je následkem čerpání energie a je svázaná se stimulovanou absorpcí, kdy pohlcená energie je předána elektronu ve valenčním pásmu polovodiče k tomu, aby mohl být excitován na vyšší energickou hladinu ve vodivostním pásmu. Energie dopadajícího fotonu musí být dostatečná na překonání zakázaného pásu polovodiče.

5.2.2. Inverze populace

V propustně polarizovaném p-n přechodu lze dosáhnout stavu populační inverze excitací molekul na vyšší energickou hladinu. V praxi, stav populační inverze znamená, že počet elektronů ve vodivostním pásu je vyšší než počet elektronů ve valenčním pásu.

5.2.3. Generování zisku

Vzniklé fotony jsou následně uvolněny. Rezonátor je na rozdíl od polovodičových laserů redukován. Nově generovaný foton stimuluje rekombinaci elektronů a děr. Výsledkem rekombinace je vznik koherentních fotonů o stejné vlnové délce, polarizaci a fázi jakou měl dopadající foton. Pozn.: Stimulovaná emise, na rozdíl od spontánní emise, závisí na intenzitě dopadajícího záření.

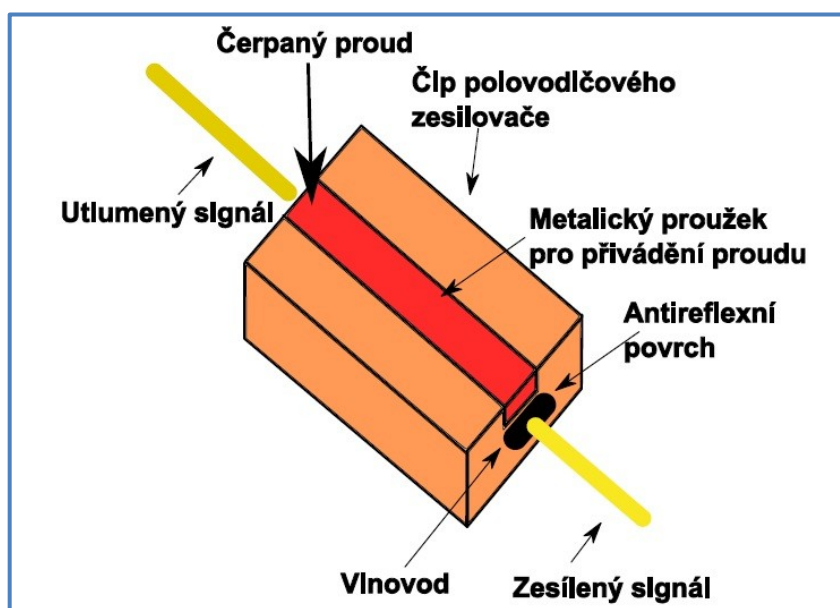
5.3. Struktura polovodičového optického zesilovače

Struktura polovodičového zesilovače je velmi podobná struktuře polovodičového laseru. Signál, který vstupuje do zesilovače je zesílen v aktivní oblasti. Zdroj čerpání je elektrické pole, které dodává energii pro zesílení. Kolem aktivní oblasti se nachází plášťová vrstva. Schéma polovodičového zesilovače je zobrazeno na obrázku 5.1. Díky velké koncentraci nosičů náboje v aktivní oblasti se zvyšuje index lomu v této oblasti. Index lomu v aktivní oblasti je tedy větší než index lomu v plášti. Tento region funguje jako vlnovod pro nově vytvořené fotony.

Celý zesilovač je vyráběn jako čip, který je umístěn do speciálního, které umožňuje regulovat teplotu a díky tomu stabilizovat pracovní vlnové délky a dosahovat maximálního zisku. Teplota se pohybuje většinou okolo 18-35 °C.

Polovodičový zesilovač je navíc vybaven antireflexní plochou, aby docházelo k co nejmenším odrazům uvnitř zesilovače. Podle toho jsou SOA rozdělené na dva základní typy:

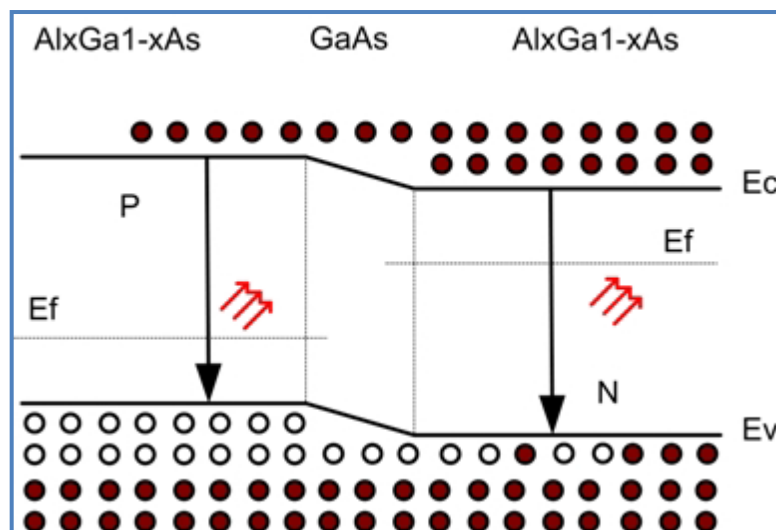
- FP-SOA (Fabry-Perot SOA) - odrazy z koncové plochy jsou významné - signál prochází zesilovačem několikrát
- TW-SOA (Travelling-Wave SOA) - odrazy z koncové plochy jsou zanedbatelné - signál prochází zesilovačem pouze jednou, využívá se antireflexních povrchových úprav. Tento typ polovodičového zesilovače je mnohem méně citlivý na kolísání řídicího proudu, teplotu a polarizaci signálu než FP-SOA [7].



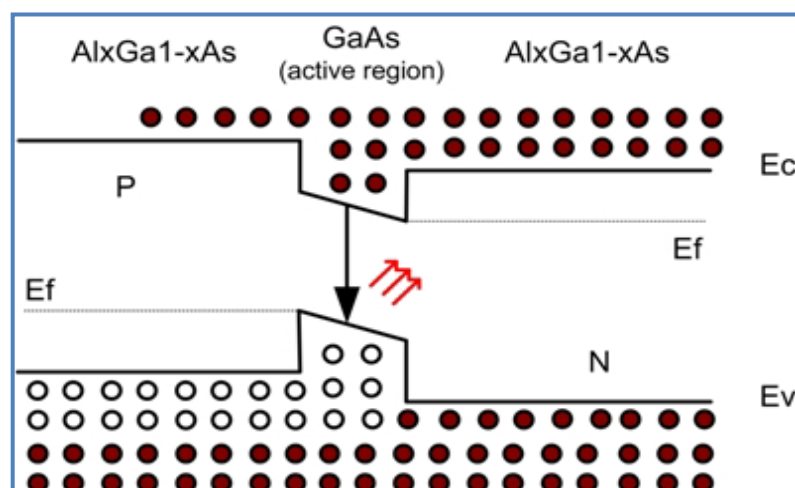
Obr 5.1: Schéma polovodičového optického zesilovače (SOA).

5.4. Typy přechodů a struktury u SOA

Jedny z věcí, které mají vliv na kvalitu SOA jsou typy přechodů u rekombinačních procesů. Jedná se buď o heteropřechody nebo homopřechody.

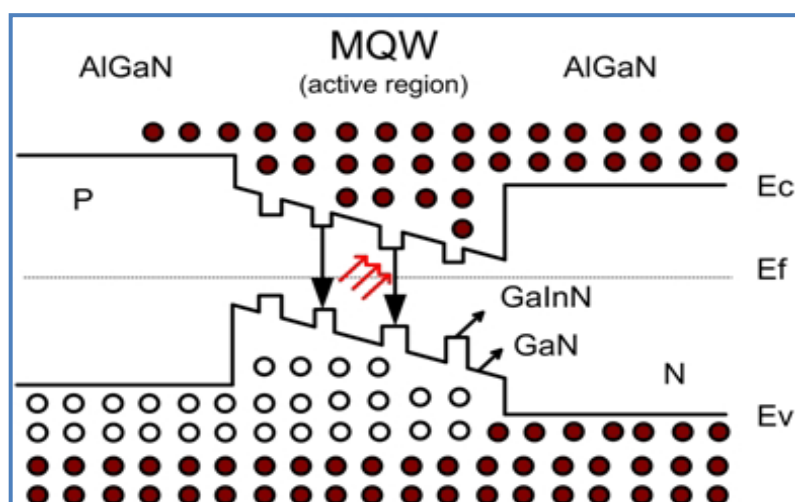


Obr 5.2: Emise záření u polovodičů - homopřechod s přiloženým napětím [7].



Obr 5.3: Emise záření u polovodičů - heteropřechod s přiloženým napětím [7].

Kromě typů přechodů mají také na zisk zesilovače vliv kvantové jamy MQW (Multiple Quantum Wells) nebo střídající se index lomu v aktivní vrstvě [7].



Obr 5.4: Řez strukturou polovodičového zesilovače s kvantovými jamami [7].

5.5. Zisk a další vlastnosti SOA

SOA pracují v pásmu 850–1600 nm. Jejich maximální teoretický zisk se pohybuje okolo 30 dB (při teplotě 18–30 °C). Ovšem u každého SOA zesilovače se objevují určité ztráty na konektorech, které jeho zisk zmenšují. Reálný SOA zesilovač používaný v praxi má zisk pouze okolo 15–20 dB. Navíc dosahované zesílení je u tohoto zesilovače ještě zmenšeno kvůli vložnému útlumu zesilovače, který se pohybuje okolo 7 dB.

SOA zesilovače jsou obecně závislé na polaritě vstupního světla, protože vlnovod, ve kterém vzniká záření, není symetrický. Dalším důležitým parametrem je šumové číslo, které je definováno jako SNR na vstupu vůči SNR na výstupu. Zdrojem šumu je spontánní emise záření. U vysokorychlostních systémů je důležitá také dynamika zisku, která udává schopnost rychlé reakce SOA na změny vstupního výkonu.

5.6. Výhody SOA

- nízké pořizovací náklady
- malá spotřeba
- snadná integrace s lasery a polovodičovými součástkami
- lepší dynamika zisku než u vláknových zesilovačů s dotací
- nepotřebuje optickou pumpu

5.7. Nevýhody SOA

- závislost pracovní vlnové délky na teplotě čipu - jsou třeba obvody pro kontrolu teploty, které zvyšují pořizovací náklady
- zisk (15-35 dB) je menší než u EDFA zesilovače (30–50 dB)
- vyšší vložný útlum, který se navíc zvyšuje po odpojení zesilovače od napájení (EDFA odpojené od čerpání vkládá do vedení malý vložný útlum)
- díky rozměrům polovodiče je citlivý na polarizaci vstupního světla
- vyšší šumové číslo (7–12 dB) než u EDFA a Ramanova zesilovače

6. Ramanovské zesilovače

6.1. Historický vývoj

Ramanův rozptyl byl poprvé publikován v roce 1928 C. V. Ramanem, který za něho později obdržel Nobelovu cenu. Hlavní podstatou tohoto objevu je vzájemná interakce světla šířícího se v určitém prostředí s tímto prostředím, jejímž důsledkem je frekvenční posuv. K zesílení optického signálu byl Ramanův rozptyl použit na začátku sedmdesátých let minulého století. Ze začátku se používal a testoval pouze v laboratořích, v praxi byl nasazen až na začátku devadesátých let minulého století [11].

6.2. Princip Ramanovských zesilovačů

V Ramanově zesilovači je signál zesílen v důsledku stimulovanému Ramanově rozptylu (SRS). Jedná se o rozptyl, při kterém dochází k přesunu energie z nižší vlnové délky na vyšší vlnovou délku a tak k zesílení signálu. Zesílení optického signálu může nastávat přímo ve vlastním vlákně přenosové trasy, tudíž není třeba žádného speciálního vlákna, jak je tomu u vláknových zesilovačů.

6.3. Zisk Ramanovských zesilovačů

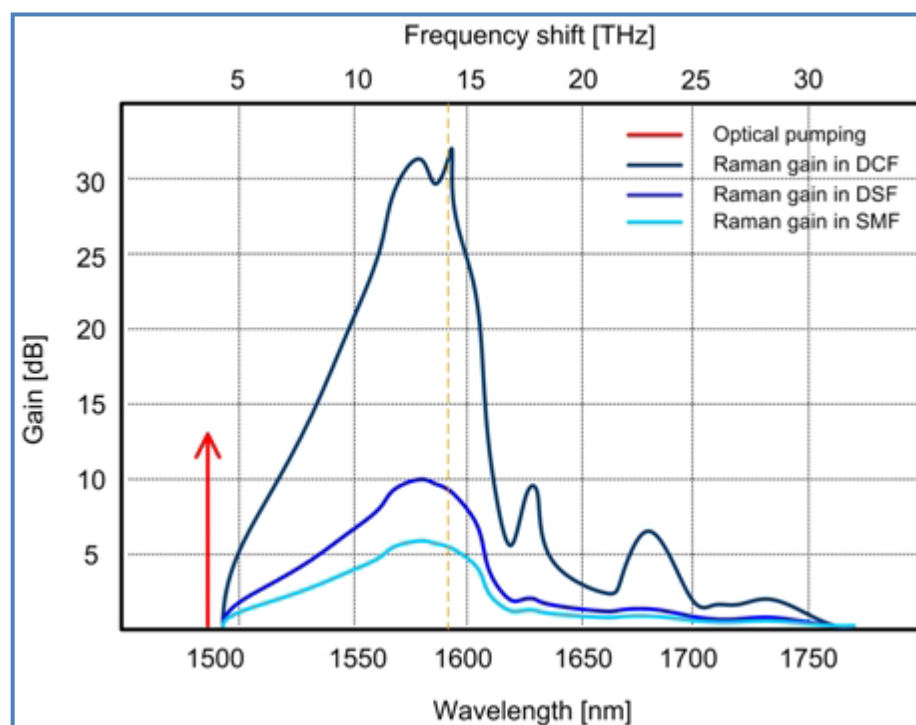
Frekvenční posuv u Ramanova zesilovače může nabývat až 30 THz oproti původní vlnové délce. Nicméně největší zisk (kolem 20 dB) nastává kolem 13,2 THz. Posun o 13,2 THz odpovídá zhruba hodnotě 100 nm. V praxi to znamená, že pro zesilovač pracující na vlnové délce na 1550 nm je třeba použít čerpací zdroj pracující na vlnové délce 1450 nm. V některých oblastech se uvádí výkon vztažen k délce vlákna, ve kterém dochází k zesílení. Jednotkou je 1/(m*W).

Vztah mezi výkonem pumpy a výstupním výkonem signálu lze odvodit z následující rovnice (platí za předpokladu souhlasné polarizace obou signálů):

$$P_s(z) = P_s(0) \cdot e^{\left(\left(\frac{C_R}{A_{eff}}\right) \cdot P_P \cdot z_{eff} - \epsilon_S \cdot z\right)} \quad (6.1)$$

- $z_{eff} = (1 - e^{-\alpha_p z}) / \alpha_p$ je efektivní délka vlákna
- C_R / A_{eff} vyjadřuje účinnost Ramanova zisku (C_R je koeficient přenosu mezi I_{SIG} a I_{PUMP} , A_{eff} je efektivní průřez jádra)
- $P_P(z)$ je výkon pumpy
- $P_s(0)$ je výkon signálu

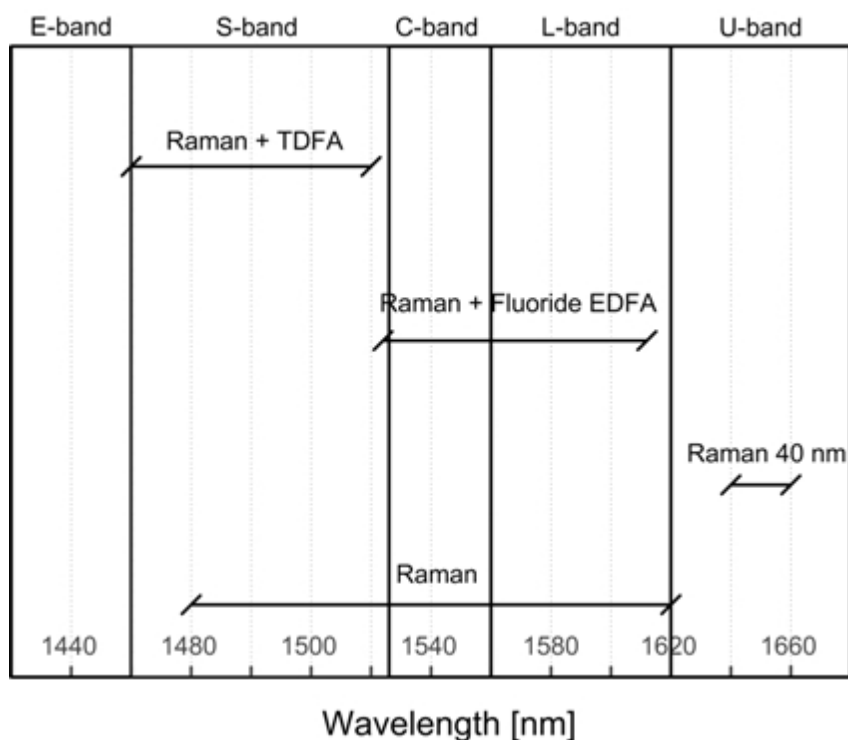
Výkon zesilovače tedy závisí nejen na výkonu a vlnové délce pumpy, ale také na délce vlákna, spektrální účinnosti a velikosti vidové plochy. Pro vygenerování největšího optického zisku jsou vhodná vlákna s nejmenší vidovou plochou jádra vlákna. V praxi se nejčastěji používá kombinace jednomodového vlákna se skokovou změnou indexu lomu SM (Single Mode Fiber) a vlákna kompenzující disperzi DCF (Dispersion Compensating Fiber) nebo vlákna s posunutou disperzi DSF (Dispersion Shifted Fiber). Zisk Ramanova zesilovače při použití všech tří typů optických vláken je zobrazen na obrázku 5.1 [7] [11].



Obr 6.1: Zisk Ramanova zesilovače pro 3 různá vlákna [7]

6.4. Spektrum vlnových délek Ramanovských zesilovačů

Velkou výhodou u Ramanova zesilovače je jeho možnost nasazení v širokém pásmu vlnových délek. Zisk závisí na vlnové délce pumpy a na dodržení frekvenčního posuvu (13,2 THz). Vlnovou délku pumpy lze také libovolně měnit (není striktně dáno jako např. u EDFA zesilovače). Dalším přínosem je fakt, že Ramanův jev přítomen v každém typu vlákna. Přehled pásem, ve kterých se nejčastěji používá Ramanův zesilovač, je na obrázku 6.2.

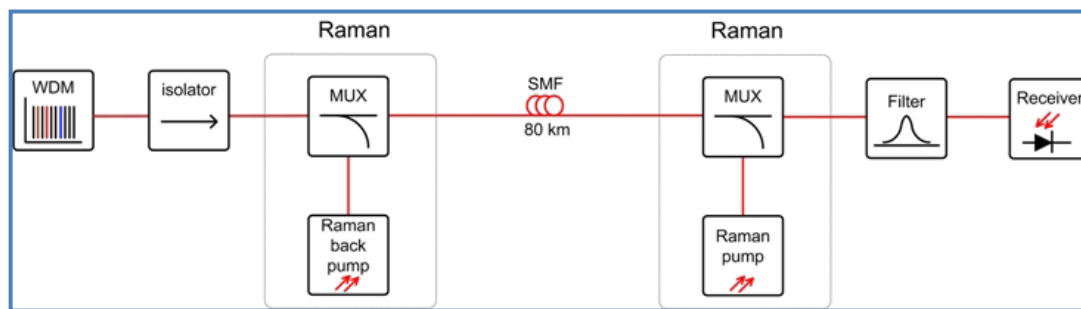


Obr 6.2: Pracovní oblasti Ramanova zesilovače [7].

6.5. Struktura Ramanovských zesilovačů

Hlavním prvkem Ramanova zesilovače je čerpací zdroj (pumpa), zpravidla se jedná o polovodičovou laserovou diodu nebo RFL (Raman Fibre Laser), který má velmi vysoký výkon (až 600 mW). Vlnová délka čerpacího zdroje je samozřejmě kratší než vlnová délka zesilovaného optického signálu.

Ramanův zesilovač se obvykle umísťuje na konec přenosového optického vlákna. Záření z laserové pumpy se tedy šíří proti zesilovanému signálu. Tento jev se označuje jako tzv. protisměrné čerpání. Protisměrné čerpání je výhodné z hlediska nižšího šumu a omezení zisku - celá trasa tlumí šum vzniklý spontánní emisí - ASE (Amplified Spontaneous Emission). Pro maximální zisk zesilovače (pracujícího jako booster) je vhodné použít větší množství čerpacích zdrojů, např. na začátku a na konci trasy.



Obr 6.3: Blokové schéma zapojení Ramanova zesilovače s protisměrným čerpáním [7].

6.6. Typy Ramanovských zesilovačů

Podle umístění zesilovače na optické trase rozlišujeme dva typy Ramanovských zesilovačů. Oba typy se odlišují použitím vlákna, ve kterém dochází k zesílení signálu. Rozprostředným (DRA-Distributed Raman Amplifier) zesilovačem nazýváme takový zesilovač, u kterého dochází k zesílení v tom samém vlákne, kde dochází také k přenosu. Jako diskretním (LRA-Lumped Raman Amplifier) nazýváme zesilovač umístěný na straně vysílače nebo přijímače jako samostatný blok.

6.6.1. DRA (Distributed Raman Amplifier) zesilovač

Tento typ zesilovače vyžaduje protisměrné čerpání. Pokud je toto čerpání umístěno na opačném konci trasy, k zisku přispívá celá optická trasa. Tím jsou průběžně vyrovnávány ztráty podél celé optické trasy. DRA zesilovač využívá většinou vlákna o délce přesahující 40 km. Mezi hlavní výhody tohoto zesilovače patří nízký šum, menší nelineární zkreslení a vyšší zisk. Nevýhodou DRA zesilovače, že infrastruktura zesilovače je umístěná po celé optické trase. Také je omezen počet pracovních vlnových délek, z důvodu odstupu kmitočtů čerpání zesilovače (v praxi se používá víc zesilovačů v přenášeném pásmu).

6.6.2. LRA (LRA-Lumped Raman Amplifier) zesilovač

Tento typ zesilovače je umístěn na určitém místě přenosové trasy. Výhodou LRA zesilovače je, že dokáže zesilovat na takových vlnových délkách, které jsou pro zesilovače dopované vzácnými prvky nerealizovatelné. Například dovede pracovat v pásmu S, které umožňuje dvojnásobně zvýšit přenosovou kapacitu oproti EDFA zesilovačům, pracujícím v pásmu C. Mezi další výhody patří umístění všech prvků na jednom místě (čerpacího zdroje a vlákna) a z toho vyplývá i lepší přístupnost.

6.7. Výhody Ramanova zesilovače

- Vysoký zisk a saturační výkon (Ramanův zesilovač může dosahovat takových výkonů, které umožňují řezání pevných látek)
- nižší šum než u polovodičového nebo vláknového zesilovače (zpravidla 5–7 dB)
- Možnost ladění vlnové délky
- Ramanův jev je přítomen v každém typu vlákna
- Může pracovat na libovolné vlnové délce v telekomunikačním pásmu
- Průběžná kompenzace ztrát u varianty s protisměrnou pumpou
- Velká přenosová kapacita u trasy s Ramanovským zesilovačem

6.8. Nevýhody Ramanova zesilovače

- Nižší účinnost na dané vlnové délce při dané úrovni optického čerpání než u EDFA
- Ohrožení nelineárními jevy, které jsou spjaté s vysokými výkony

7. Srovnání optických zesilovačů

V tabulce 7.1 jsou uvedené parametry všech tří základních skupin optických zesilovačů. Maximálním ziskem disponuje vláknový zesilovač, který dosahuje zisku až 50 dB. Tento zesilovač také vkládá do vlákna nejnižší šum. Pracovní šířka pásma vláknového zesilovače je však menší než u Ramanova nebo SOA zesilovače. SOA zesilovač patří mezi nejlevnější zesilovače, který dokáže pracovat v kterémkoli pásmu. Mezi jeho nevýhody patří vysoká úroveň šumu. Ramanův zesilovač patří mezi nejdražší optické zesilovače, dokáže rovněž pracovat v širokém pásmu vlnových délek a jeho zesílení je vyšší než u SOA zesilovače.

Optický zesilovač	EDFA	SOA	Ramanův z.
Maximální zisk (dB)	30–50	15–30	30
Šířka pásma (nm)	30	60–70	závisí na zdroji
Vlnová délka (nm)	závisí na typu vlákna	1260–1650	1260–1650
Úroveň šumu (dB)	4–6	7–12	3–5
Polarizační citlivost	ne	ano	ano
Zdroj čerpání	optický	elektrický	optický
Max. saturace (dBm)	22	18	0,75 x čerpací zdroj
Cena	střední	nízká	vysoká

Tab. 7.1: Srovnání všech tří skupin optických zesilovačů.

8. Simulace optických zesilovačů ve WDM-PON síti v programu OptiSystem

V této části budeme simulovat jednotlivé optické zesilovače na optické trase ve WDM-PON síti v programu OptiSystem.

OptiSystem je komplexní software, který uživatelům umožňuje testovat, simulovat a optimalizovat jakýkoliv druh optického spoje na fyzické vrstvě širokého spektra optických sítí. Obsahuje simulační prostředí a hierarchickou definici komponent a systémů. OptiSystem je kompatibilní s OptiAmplifier a OptiBPM design tools. Nabízí širokou škálu aplikací - CATV / WDM sítě, SONET / SDH apod [12].

8.1. Nastavené parametry WDM-PON

Pro WDM-PON síť budeme v naší simulaci používat C a L pásmo. C pásmo bude použito pro odesílání (uplink) a L pásmo bude použito pro stahování (downlink). Odstupy jednotlivých kanálů budou 100 GHz (vlnová délka 0,8 nm). Celkem bude WDM-PON síť obsahovat 32 ONU jednotek. Na přenosové trase mezi ONT a ONU budeme testovat jednotlivé optické zesilovače. Délka optické trasy bude 5, 10, 15, 20, 25 a 30 km. Naším úkolem bude změřit vysílací a přijímací výkon (jak na straně OLT, tak na straně ONU), chybovost a Q-faktor pro přenosovou rychlost $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ symetricky.

8.1.1. Optické linkové zakončení (OLT)

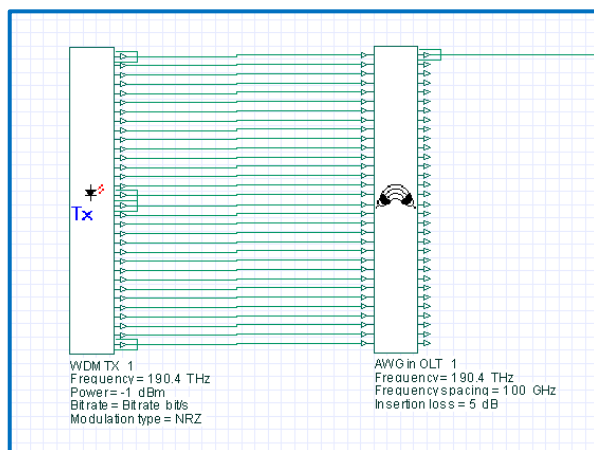
V naší simulaci se OLT jednotka skládá z optického vysílače i přijímače. Nastavené parametry na OLT vysílači vychází z reálných hodnot OLT jednotky LG-Ericsson EA 1100. Parametry nastavené na OLT vysílači jsou následující:

- **Pilotní frekvence WDM vysílače 190,4 THz** - zvolená frekvence odpovídá 1. kanálu. Další kanály vysílají na frekvenci 190,3 THz; 190,2 THz až k 187,3 THz, na které vysílá 32. kanál
- **Frekvenční odstup 100 GHz** - jedná se o odstup mezi jednotlivými kanály
- **Vysílací výkon -1 dBm** - tento vysílací výkon odpovídá výkonu na jednom kanále. Vycházíme z reálných hodnot z OLT jednotky LG-Ericsson EA 1100
- **Modulace NRZ** - nejčastěji používaná modulace v optických komunikacích
- **Přenosová rychlost $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$** - nastavená přenosová rychlost pro downlink

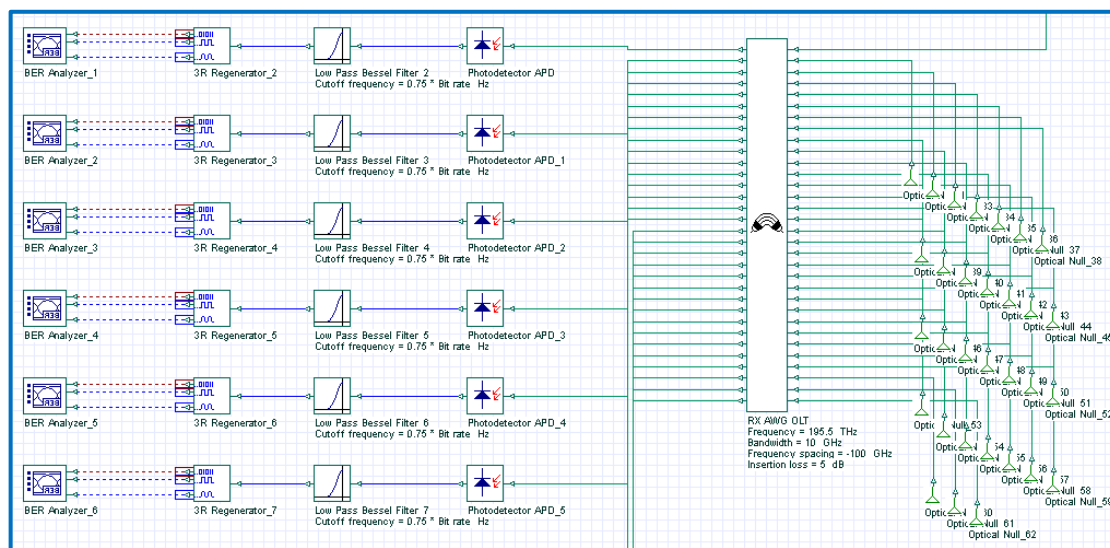
Dále je součástí OLT vysílače 32-pinový *AWG splitter*, který slouží pro multiplexování jednotlivých signálů. Jeho frekvence je nastavena na 190,4 THz s odstupem 100 GHz podle specifikace G.694.1 [13]. Vložný útlum byl nastaven na 5 dB.

Na optickém přijímači na straně OLT se nachází *PIN* fotodioda s citlivostí 1 A/W, dolní propust pro odfiltrování vysokofrekvenčního šumu. Následuje *3R Regenerator*, který obnoví tvar signálu a časovou základnu. Za 3R Regenerátorem je umístěn *BER analyzer*, který nám spočítá chybovost a Q-faktor pro daný kanál.

Přijímací část OLT jednotky tvoří 32-pinový *AWG splitter*, který slouží pro demultiplexování přijímaného signálu. Jeho frekvence je nastavena na 195,5 THz s odstupem -100 GHz podle specifikace G.694.1 [13]. Vložný útlum je nastaven stejně jako u *AWG splitteru* v OLT vysílaci na 5 dB. Nepoužité vstupní piny jsou připojeny optickou nulou.



Obr 8.1: Vysílací část WDM-PON sítě na straně OLT.

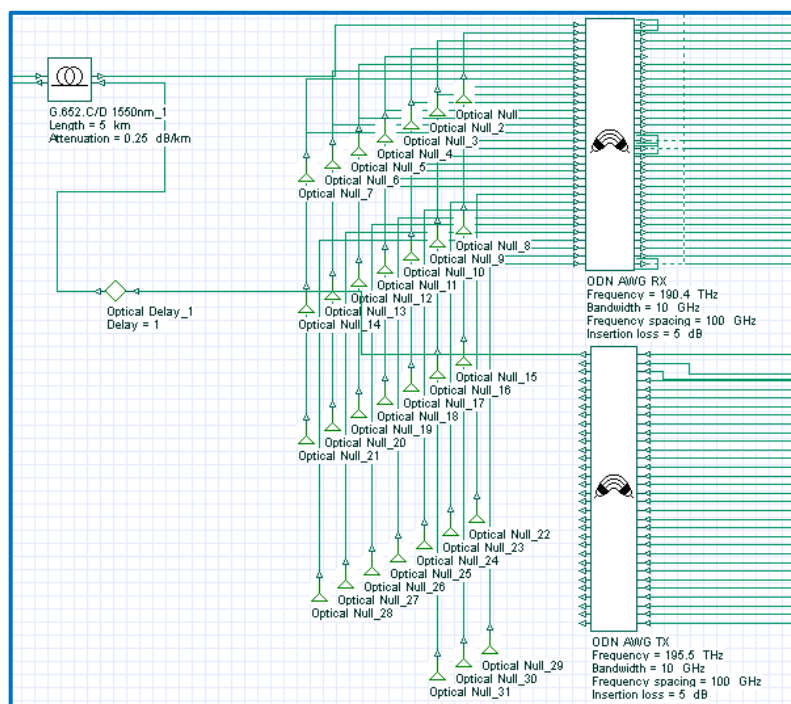


Obr 8.2: Přijímací část WDM-PON sítě na straně OLT.

8.1.2. Optická distribuční část (ODN)

V optické distribuční části bylo použito jednovláknové optické vlákno, které odpovídá parametrům vlákna G.652.C/D. Vložný útlum byl nastaven na 0,25 dB/km, koeficient chromatické disperze na 16,75 ps/nm/km, náběh disperze 0,075 ps/nm²/km a dynamický šum 3dB. Délka optického vlákna se mění od 5 km do 30 km s odstupem 5 km. Na konci optické trasy je v každém směru umístěn optický zesilovač s nastavenými parametry, které odpovídají parametrům reálného zesilovače. Ve zpětném směru jsou umístěny prvky *optical delay*, aby bylo možné simulovat v obou směrech zároveň. S tímto prvkem souvisí i nastavení počtu opakování simulace, které nastavíme v záložce *Layout Parameters, Signals* - nastavená hodnota by měla odpovídat počtu nasazených prvků *optical*

$delay + 1$. Dále je v každém směru nasazen 32-pinový *AWG splitter*, jehož parametry odpovídají parametrům popsaným výše.



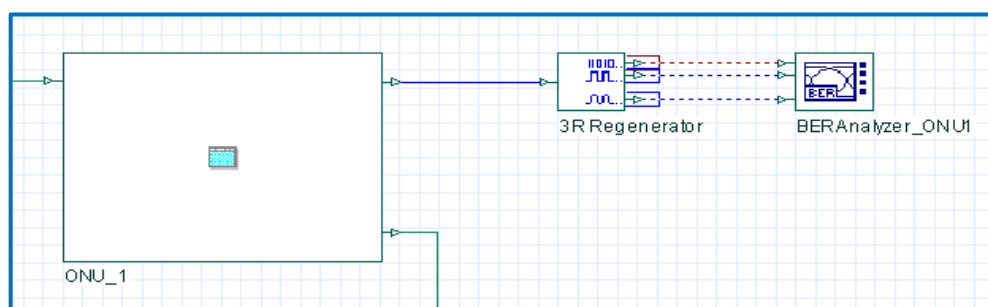
Obr 8.3: ODN WDM-PON síť.

8.1.3. Optická koncová jednotka (ONU)

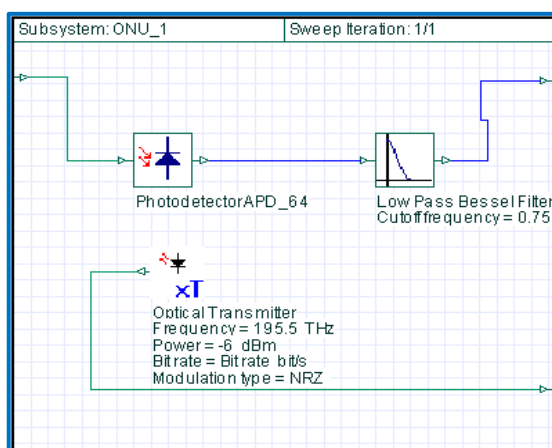
V této části se nachází 32 ONU jednotek. Optickou koncovou jednotku tvoří opět vysílací a přijímací část. Vysílací část tvoří optický vysílač s níže nastavenými parametry:

- **Vysílací frekvence 195,5 THz** - na této frekvenci vysílá 1. ONU jednotka. Další ONU jednotky vysílají na frekvenci 195,4 THz; 195,3 THz až k 192,4, na které vysílá 32. ONU jednotka
- **Výkon -6 dBm** - hodnota tohoto vysílaného výkonu odpovídá reálné hodnotě na ONU jednotce LG-Ericsson EARU 1112
- **Modulace NRZ** - stejná modulace jako ve vysílací části v OLT jednotce
- **Přenosová rychlost 2,5 Gbit · s⁻¹** - nastavená přenosová rychlost pro uplink

Na optickém přijímači na straně ONU se nachází *PIN* fotodioda s citlivostí 1 A/W, dolní propust pro odfiltrování vysokofrekvenčního šumu. Následuje *3R Regenerator*, který obnoví tvar signálu a časovou základnu. Za *3R Regeneratorem* je umístěn *BER analyzer*, který nám spočítá chybovost a Q-faktor pro daný kanál.



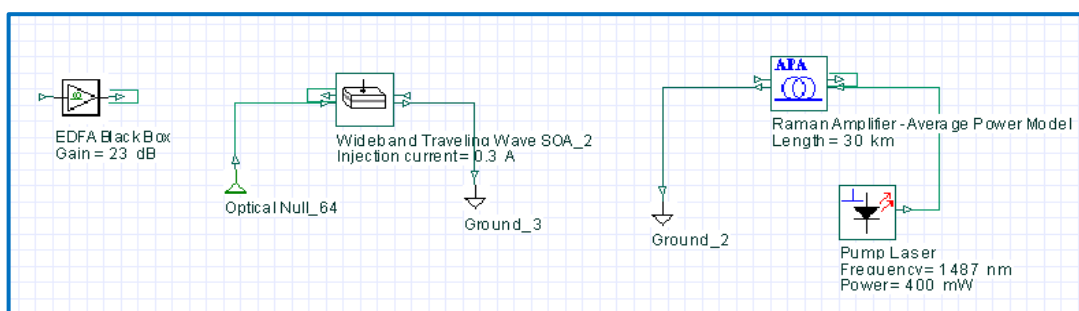
Obr 8.4: ONU jednotka WDM-PON sítě.



Obr 8.5: ONU jednotka WDM-PON sítě (detailněji).

8.1.4. Optické zesilovače

Do přenosové trasy byly aplikovány 3 druhy optických zesilovačů - EDFA zesilovač, polovodičový optický zesilovač a Ramanův zesilovač. EDFA zesilovač a polovodičový optický zesilovač byly nasazený na konci optické trasy. Nasazený Ramanův zesilovač odpovídal typu DRA (Distributed Raman Amplifier). Nastavené parametry odpovídají parametrům reálných zesilovačů.



Obr 8.6: Použité optické zesilovače na přenosové trase.

EDFA zesilovač

Parametry zesilovače nasazeného v C a L pásmu vycházejí z reálného EDFA zesilovače "WRA217", respektive "WRA-217L". Oba typy zesilovačů se liší pouze v pásmu, ve kterém pracují. Jako EDFA zesilovač byla v programu OptiSystem vybrána součástka *EDFA Black Box*. U tohoto

zesilovače byl nastaven gain na 23 dB a noise na 5 dB, ostatní parametry zůstaly v defaultním nastavení. Zesilovač byl umístěn na konec trasy, kde měl nejlepší výsledky pro chybovost a Q-faktor. Důležité parametry "WRA-217(L)" jsou napsány v tabulce 8.1.

Parameter	Minimum	Maximum
Operating wavelength range	1530 (1570) nm	1563 (1607) nm
Input power range	-29 dBm	+4 dBm
Output power range	-6 dBm	+17 dBm
Input LOS threshold configurable range	-38 dBm	0 dBm
Gain	13 dB	23 dB
Noise	4 dB	6 dB

Tab. 8.1: Parametry WRA-217 (L) zesilovače.

Polovodičový optický zesilovač (SOA)

Nastavené parametry pro polovodičový optický zesilovač vycházejí z reálného zesilovače "SAC20r". Pro účely simulace v programu OptiSystem byla vybrána součástka *Wideband Traveling Wave SOA*. Vhodné nastavení parametrů pro tento zesilovač je velmi obtížné, protože tento zesilovač se vyznačuje vyšším šumem než ostatní zesilovače, který stoupá s rostoucí hodnotou injekčního proudu. Byla provedena simulace na trasách 5 km a 30 km, na kterých se měnila hodnota injekčního proudu (50 mA, 100 mA, 200 mA a 300 mA). Obecně po nastavení nižších injekčních proudů (50-100 mA) vykazoval zesilovač menší zesílení a nižší šum (výsledná hodnota Q-faktoru byla vyšší). U vyšších injekčních proudů (200-300 mA) zesilovač dokázal více zesílit úroveň signálu na jeho vstup, avšak také přidal do signálu nežádoucí šum - výsledná hodnota Q-faktoru byla nižší a chybovost často rovnala 1. Tabulka 8.2 ukazuje nastavené hodnoty injekčního proudu na trase 30 km a zjištěnou výkonovou úroveň na jednotlivých kanálech na konci trasy ve směru downlink, výkon za vysílačem byl pořád stejný (-3,596 dBm). Tabulka 8.3 ukazuje zjištěné hodnoty Q-faktoru a chybovosti pro různé hodnoty injekčního proudu ve směru downlink a uplink pro trasu 30 km.

Injekční proud [mA]	Rozsah výkonových úrovní na ONU jednotkách [dBm]
50	-18–(-19)
100	-13–(-14)
200	-9–(-10)
300	-7,5–(-8,5)

Tab. 8.2: Nastavené injekční proudy a jim odpovídající výkonové úrovně na konci trasy ve směru downlink.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
50	$4 \cdot 10^{-12} - 9 \cdot 10^{-10}$	6,0–6,8	$1 \cdot 10^{-12} - 9 \cdot 10^{-10}$	6,8–7,2
100	$5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-8}$	5,0–6,0	$1 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-7}$	5,0–6,5
200	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$	3,0–4,5	$2 \cdot 10^{-7} - 9 \cdot 10^{-5}$	3,0–4,7
300	$2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	1,8–3,6	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$	2,1–3,2

Tab. 8.3: Nastavené injekční proudy a jím odpovídající hodnoty chybovosti a Q-faktoru na konci trasy ve směru downlink a uplink.

Pro zjištění daných hodnot v tabulkách byl umístěn zesilovač na konci optické trasy. Byly provedeny i simulace se zesilovačem umístěným na začátku optické trasy, ale výstupní výkon na straně OLT vysílače byl moc silný, takže signál nebyl vůbec zesílen a navíc k němu byl přidán ještě nežádoucí šum. Výsledná chybovost potom byla často 1 a Q-faktor se pohyboval kolem hodnoty 2. Pro umístění zesilovače uprostřed optické trasy byly výsledky rovněž horší, než pro umístění zesilovače na konec optické trasy. Podle zjištěných hodnot chybovosti, Q-faktoru a výstupních výkonů bylo vhodné nastavit injekční proud na 100 mA a zesilovač umístit na konec optické trasy.

Důležité parametry polovodičového optického zesilovače "SAC20r" jsou napsány v tabulce 8.4.

Parameter	Minimum	Typical	Maximum
Operating wavelength range	1450 nm	-	1600 nm
Peak Gain	19 dB	-	
Gain Ripple	-		2
Saturation Output Power	7 dBm	-	-
Operating Bias Current	-	300 mA	-
Noise	7 dB	-	-
Total Power Consumption	-	-	4 W

Tab. 8.4: Parametry polovodičového zesilovače "SAC20r".

Ramanův zesilovač

Ramanův zesilovač je v programu OptiSystem reprezentován prvkem *Raman Amplifier - Average Power Model*, který symbolizuje optickou trasu mezi OLT jednotkou a koncovou jednotkou ONU, ve které probíhá zesílení. Délka trasy byla 5, 10, 15, 20, 25 a 30 km. Útlum vlákna byl nastaven na 0,2 dB/km a Raman gain peak je nastaven na $95 \cdot 10^{-15}$. Dále je k tomuto prvku připojen prvek s názvem *Pump Laser*, který má funkci čerpacího zdroje. Tento čerpací zdroj je připojen v opačném směru na konci trasy. Jeho výkon je nastaven ve směru downlink na 400 mW a ve směru uplink na 500 mW. Ve směru uplink byl tento čerpací zdroj nastaven i na 400 mW, ale pak se projevovaly velké rozdíly ve zjištěných výkonových úrovních na konci trasy, Q-faktoru a chybovosti, které byly způsobené menším vysílacím výkonem na ONU jednotce (na OLT jednotce je nastaven vysílací výkon na -1 dBm a na ONU jednotce je nastaven na -6 dBm). Nastavené hodnoty na čerpacím zdroji vychází z reálného laseru "JDSU S36 series 14xx", jehož vysílací výkon lze nastavit až na 600 mW (při vlnové

délce 1425-1470 nm) nebo 550 mW (při vlnové délce 1470-1495 nm). Vlnová délka u čerpacího zdroje ve směru downlink byla nastavena na 1487 nm a ve směru uplink na 1445 nm.

8.2. Měřené parametry

Bitová chybovost (BER)

Chybovost je obecně dána poměrem chybně přenesených bitů digitálního signálu k celkovému počtu přenesených bitů. Označuje se anglickou zkratkou BER (Bit Error Rate). Výše uvedenou definici lze vyjádřit vztahem:

$$BER = \frac{m_e}{v_t \cdot t_m} [-; bit; b/s; s] \quad (8.1)$$

kde m_e je počet chybně přijatých bitů, v_t je přenosová rychlost, t_m je celková doba měření. Pro spolehlivou komunikaci je vyžadována obvykle velice nízká hodnota bitové chybovosti, řádově:

- 10^{-3} (tj. 1 chyba z tisíce) je limit pro provoz linkových systémů PCM pro telefonii
- 10^{-6} (tj. 1 chyba z milionu) je hodnota, která se prakticky neprojeví na kvalitě přenášovaných hovorů, vyhovující i pro běžný přenos dat
- 10^{-7} minimální hodnota pro provoz xDSL připojek
- 10^{-10} nebo 10^{-12} jsou hodnoty vyžadované v optických komunikacích [14] [15]

Q-faktor

Q-faktor nebo také Quality faktor. Pomocí Q-faktoru můžeme určit kvalitu signálu. Kvalita signálu je u tohoto parametru vypočítána podle odstupu signálu od šumu. Ve výpočtu Q-faktoru jsou obsaženy všechny šумы, nelinearity nebo také disperze. Tyto jevy negativně působí na kvalitu signálu a v důsledku toho zvyšují bitovou chybovost. Interpretace hodnoty Q-faktoru je jednoduchá, čím vyšší je jeho hodnota, tím vyšší je kvalita signálu. Q-faktor je vyjádřen následující:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} [-] \quad (8.2)$$

Kde představuje I_1 logickou úroveň „1“, I_0 představuje logickou úroveň „0“, σ_1 představuje standardní odchylku logické úrovně „1“ a σ_0 představuje standardní odchylku logické úrovně „0“.

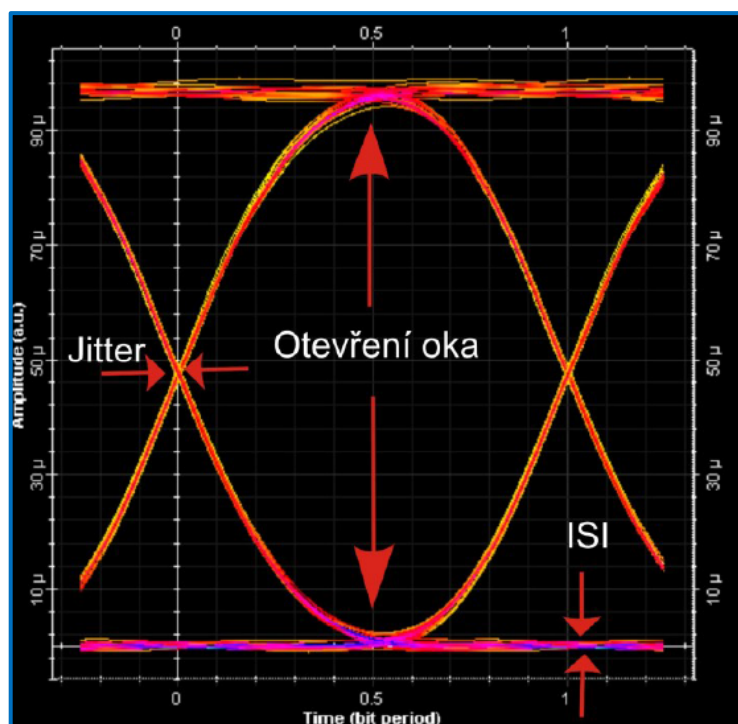
Kvalitu signálu můžeme rozdělit následujícím způsobem:

Hodnota Q faktoru	Kvalita signálu
Větší než 6	Vynikající
Mezi 5 a 6	Dobrá
Mezi 4 a 5	Akceptovatelná
Menší než 4	Signál je hůře detekovatelný, popřípadě už není detekován

Tab. 8.5: Hodnocení kvality signálu podle Q-faktoru.

Diagram oka

Základní parametry, které se u diagramu určuje, je otevření oka a šířka oka. Otevření oka představuje rozeznatelnost logické 1 od logické 0. Jestli je oko více otevřené, je větší i rozeznatelnost, z důvodu většího odstupů signálu od šumu a tím je vyšší i kvalita samotného signálu. Druhým ukazatelem je ISI nebo také intersymbol interference. ISI je způsobeno překrytím jednotlivých modulačních impulsů. Posledním ukazatelem je takzvaný „Jitter“. Jitter představuje kolísání zpoždění a toto zpoždění je následně definováno jako krátkodobá odchylka digitálního signálu z jeho ideální pozice. Na následujícím obrázku níže je znázorněn diagram oka z vyznačenými parametry [14] [15].



Obr. 8.7 Diagram oka s vyznačenými parametry.

8.3. Výsledky simulace

Tato kapitola obsahuje výsledky všech tří typů optických zesilovačů. Přenosová rychlost byla nastavena na $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ symetricky. Zesilovač byl umístěn na konci trasy.

8.3.1. Simulace EDFA zesilovače

Nastavené parametry zesilovače jsou popsány výše. Optický výkon, chybovost a Q-faktor byl změřen na kanálech 1, 16, 17, 32 v obou směrech. Délka trasy se měnila podle zadání.

Délka trasy: 5 km

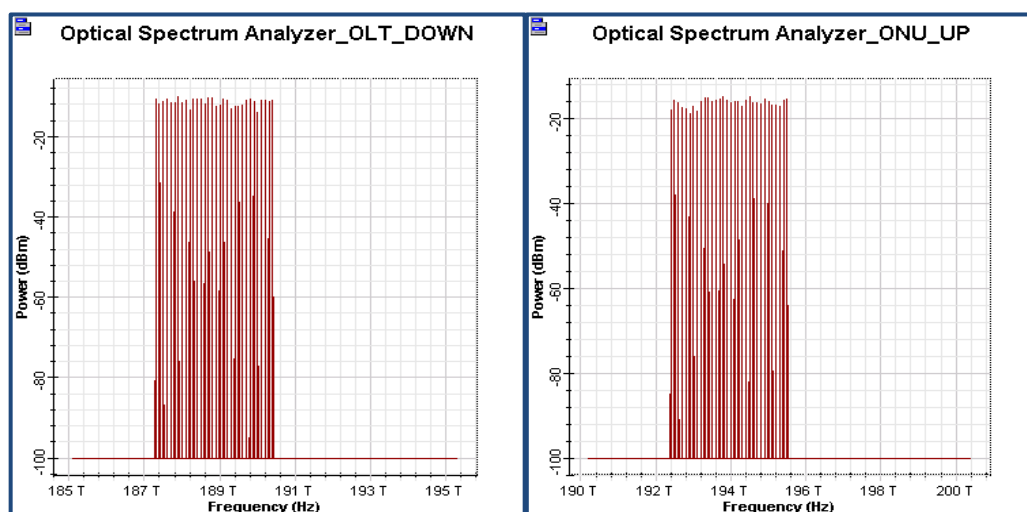
Délka optické trasy byla nastavena na 5 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.6. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	0,194	-8,652	0,341
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-6,455	-8,652	-3,000
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-6,861	-8,652	-2,803
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-8,009	-8,652	-1,196
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	8,203	0	3,341

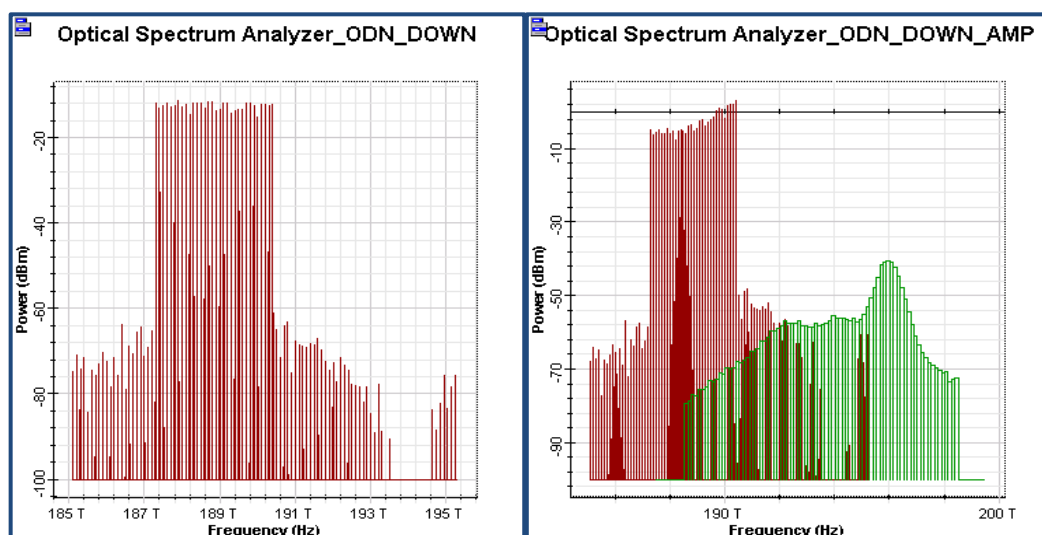
Tab. 8.6: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Můžeme si všimnout, že u 1. kanálu na trase downlink je výkonová úroveň signálu před přijímačem vyšší než zjištěná výkonová úroveň na výstupu vysílače. Na trase uplink je přijímaná úroveň signálu vyšší na všech kanálech než vysílaná úroveň. Může to být způsobeno použitím zesilovače s vysokým zesílením na poměrně krátké trase.

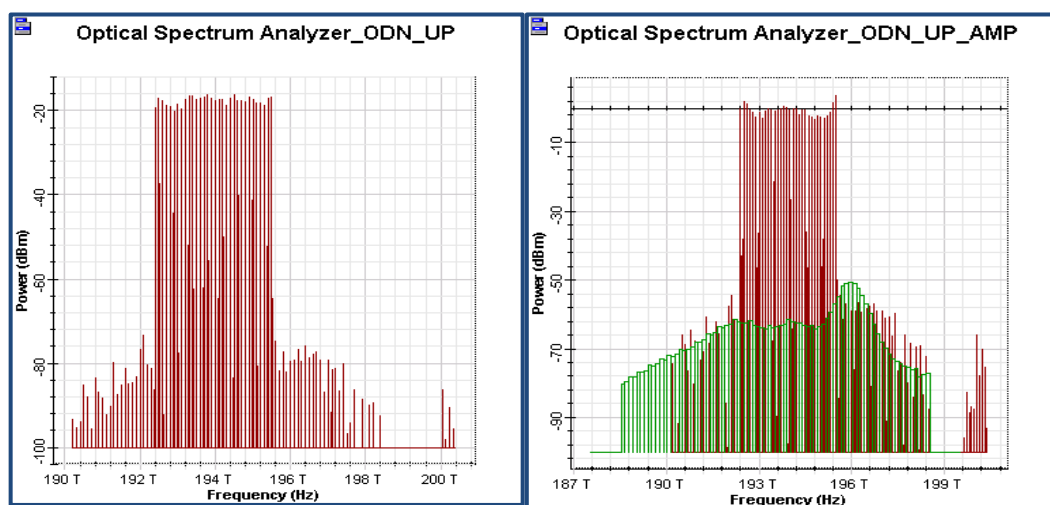
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum za AWG splitterem, spektrum na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Z obrázků je patrné, že jednotlivé kanály mají za AWG splitterem stejné výkonové úrovně, ale na konci optické trasy za zesilovačem se jednotlivé výkonové úrovně liší až o několik dBm. Může to být způsobeno tím, že EDFA zesilovač nezesiluje rovnoměrně všechny vlnové délky, ale některé zesiluje více a některé méně (viz. kapitola 3). Za AWG splitterem je přidán k optickému signálu nežádoucí šum (vyznačen červeně vedle vlnových délek užitečného signálu). Rovněž do optického spektra přidává EDFA zesilovač šum (ASE), vzniklý spontánní emisí (vyznačen zeleně).



Obr. 8.8: Optické spektrum za AWG splitterem na straně OLT pro směr downlink a optické spektrum za AWG splitterem na straně ONU pro směr uplink (pro další trasy s EDFA zesilovačem budou stejné).



Obr. 8.9: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).

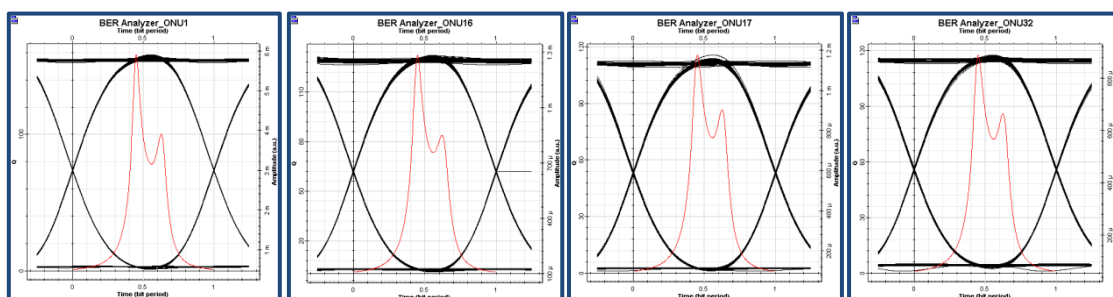


Obr. 8.10: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

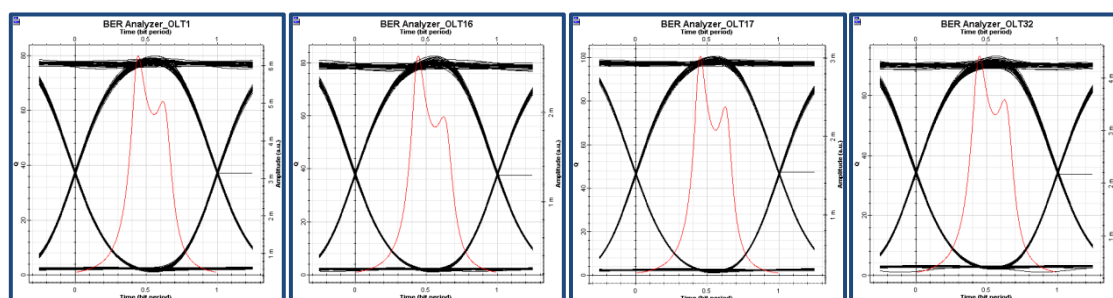
V tabulce 8.7 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Je vidět, že chybovost na dané optické trase s použitým zesilovačem je nulová, stejně tak hodnota Q-faktoru je vyšší než 6, což nám zaručuje bezchybný přenos.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	158,382	0	79,796
16. kanál	0	132,205	0	110,059
17. kanál	0	115,594	0	100,660
32. kanál	0	117,624	0	73,161

Tab. 8.7: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry



Obr. 8.11: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.12: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 10 km

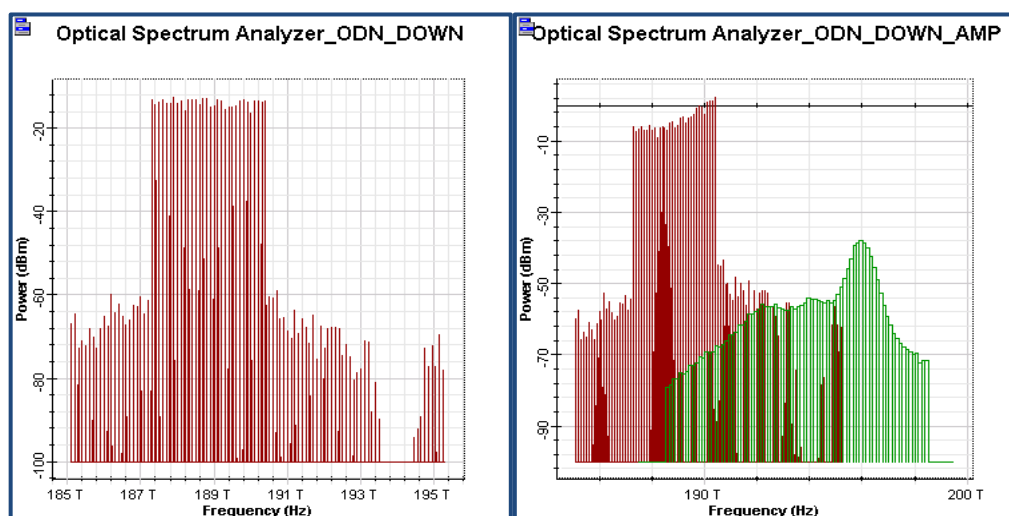
Délka optické trasy byla nastavena na 10 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.8:

Parametr	Downlink		Uplink	
	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-0,557	-8,652	0,698
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-7,430	-8,652	-3,237
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-7,822	-8,652	-2,992
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-9,080	-8,652	-0,926
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	8,523	0	3,935

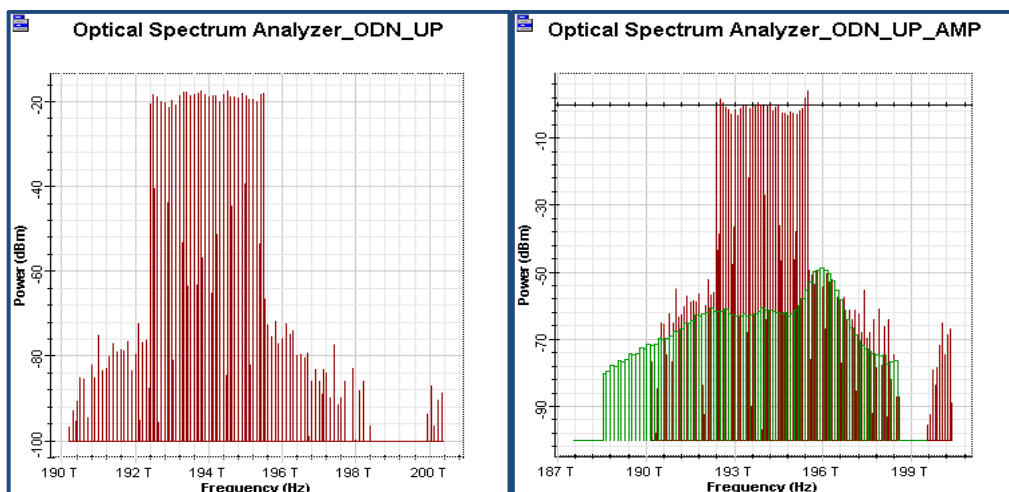
Tab. 8.8: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Opět můžeme vidět velké rozdíly výkonových úrovní zesílení ve směru downlink, které může být způsobeno nerovnoměrným zesílením EDFA zesilovače. Na trase downlink klesl zjištěný výkon před přijímačem cca o 1 dBm a na trase uplink klesl výkon nepatrně.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Spektrum za AWG splitterem je stejné jako u trasy 5 km. Opět je k užitečnému signálu přidán nežádoucí optický šum a šum, vzniklý spontánní emisí (ASE).



Obr. 8.13: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).

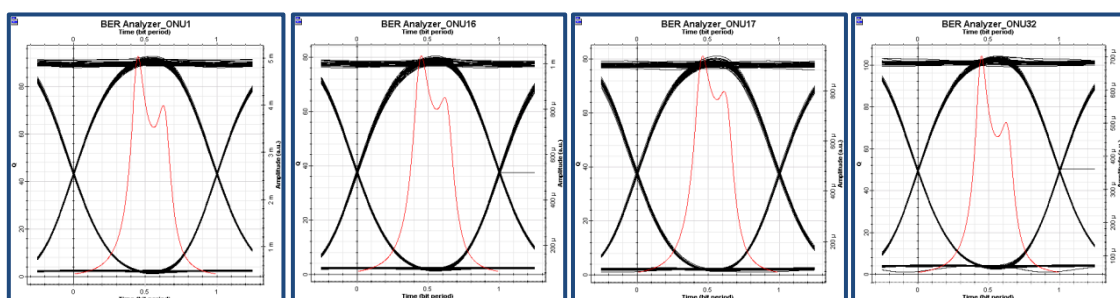


Obr. 8.14: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink)

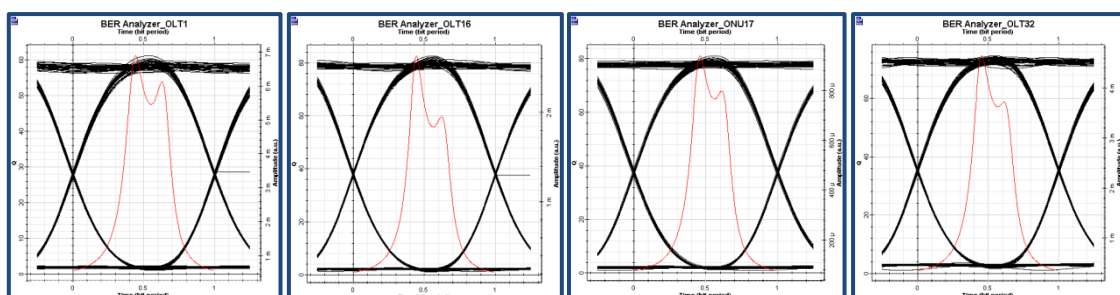
V tabulce 8.9 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Chybovost je opět nulová a hodnota Q-faktoru je větší než 6. Můžeme si však všimnout velkého poklesu Q-faktoru v obou směrech oproti trase 5 km (v případě 1. kanálu o 65).

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	92,802	0	61,111
16. kanál	0	80,466	0	83,561
17. kanál	0	81,148	0	89,422
32. kanál	0	104,257	0	74,620

Tab. 8.9: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.15: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy)



Obr. 8.16: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 15 km

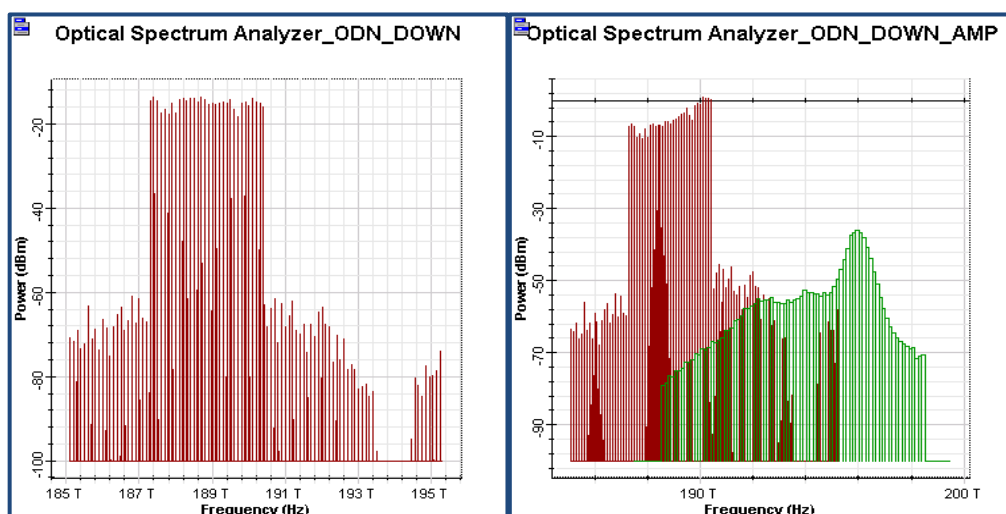
Délka optické trasy byla nastavena na 15 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.10.

Parametr	Downlink		Uplink	
	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-1,373	-8,652	1,001
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-8,446	-8,652	-3,464
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-8,899	-8,652	-3,235
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-10,138	-8,652	-0,674
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	8,765	0	4,465

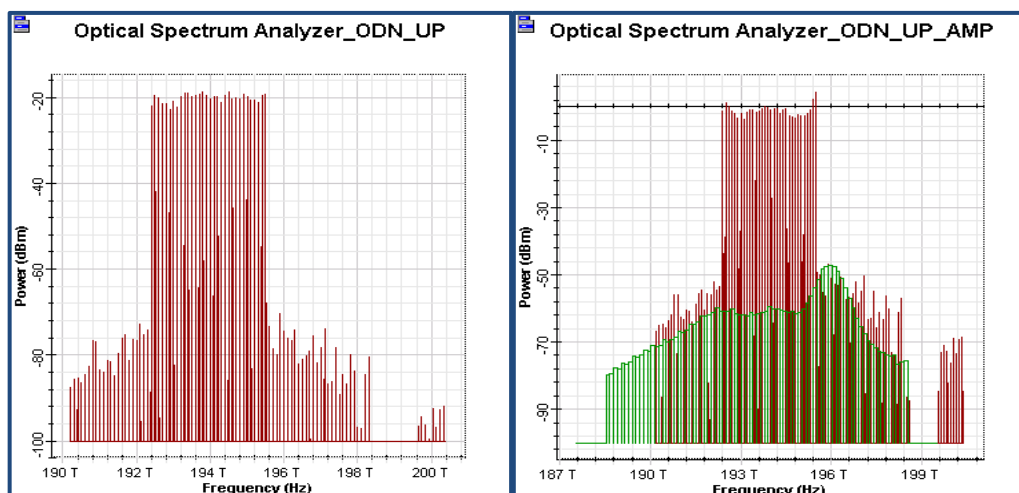
Tab. 8.10: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Rozdíly výkonových úrovní jsou opět větší ve směru downlink, než v případě trasy 10 km. Na trase downlink klesl zaznamenaný výkon před přijímačem opět o 1 dBm.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Můžeme si všimnout, že zesílení na konci trasy downlink už není tak velké, jako v případě trasy s délkou 5 km. Spektrum za AWG splitterem je stejné jako u trasy 5 km.



Obr. 8.17: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).

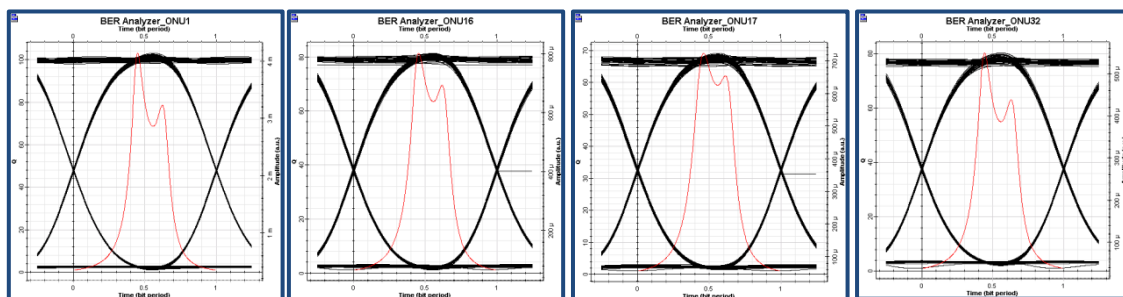


Obr. 8.18: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

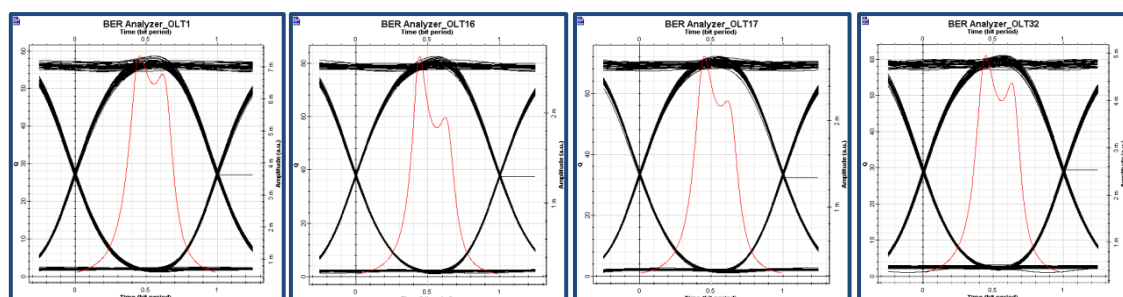
Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru jsou zaznamenány v tabulce 8.11. Chybovost je opět nulová a hodnota Q-faktoru je větší než 6.

Parametr	Downlink		Uplink	
	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	103,032	0	58,627
16. kanál	0	81,425	0	82,539
17. kanál	0	69,167	0	72,186
32. kanál	0	80,308	0	61,025

Tab. 8.11: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry



Obr. 8.19: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.20: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 20 km

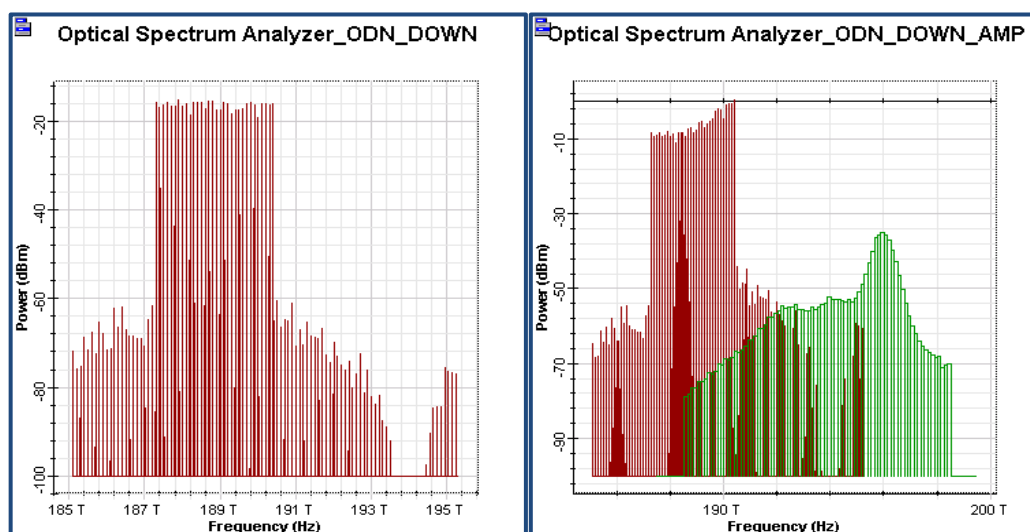
Délka optické trasy byla nastavena na 20 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.12:

Parametr	Downlink		Uplink	
	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-2,399	-8,652	1,230
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-9,528	-8,652	-3,745
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-10,025	-8,652	-3,495
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-11,284	-8,652	-0,490
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	8,885	0	4,975

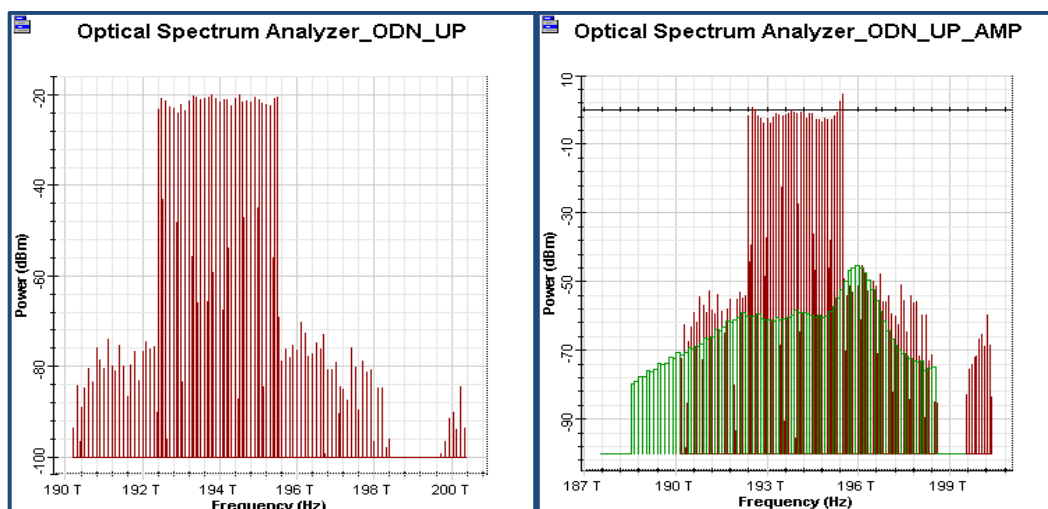
Tab. 8.12: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Rozdíly výkonových úrovní jsou opět větší ve směru downlink, než v případě trasy 15 km. Na trase downlink klesl zaznamenaný výkon před přijímačem opět o 1 dBm. Na trase uplink už narostla odchylka na 4,975 dBm (v případě trasy o délce 5 km to bylo 3,341 dBm)

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Spektrum za AWG splitterem je stejné jako u trasy 5 km.



Obr. 8.21: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink)

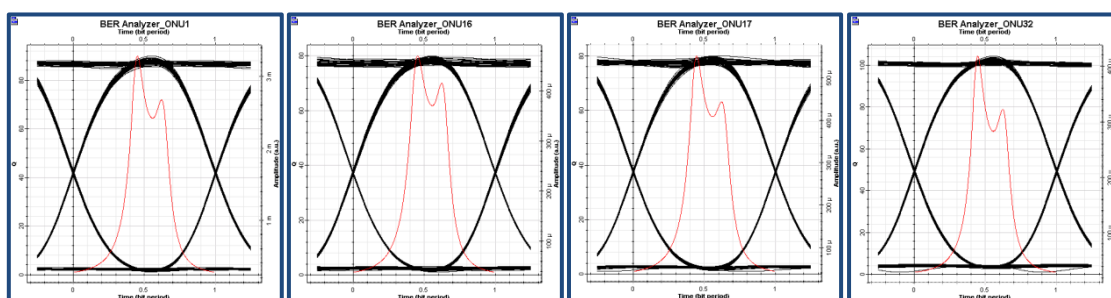


Obr. 8.22: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

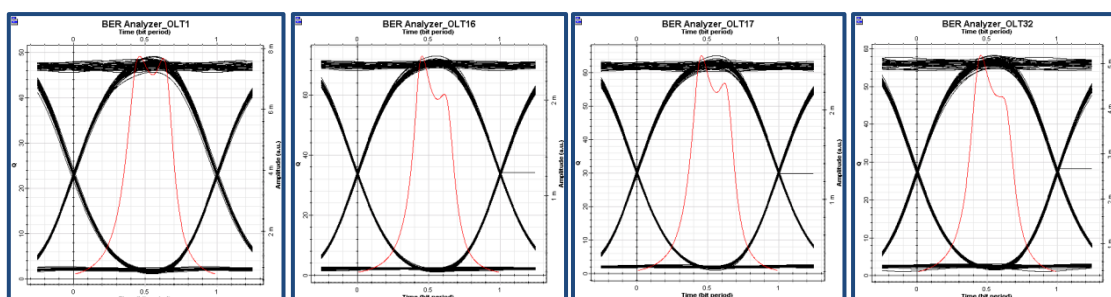
Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech jsou zaznamenány v tabulce 8.13. Chybovost je opět nulová a hodnota Q-faktoru je větší než 6.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	89,928	0	49,099
16. kanál	0	88,804	0	72,944
17. kanál	0	80,033	0	65,081
32. kanál	0	104,359	0	58,253

Tab. 8.13: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.23: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.24: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 25 km

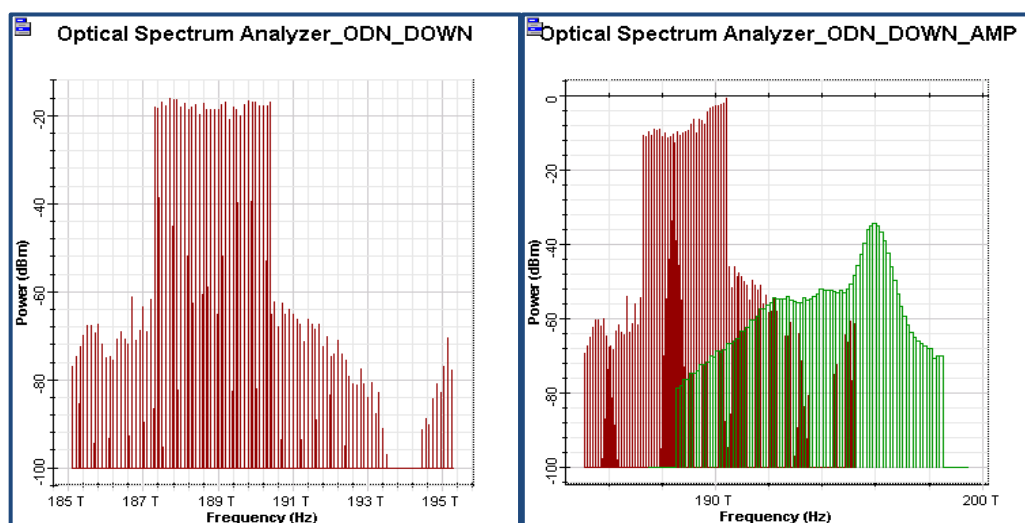
Délka optické trasy byla nastavena na 25 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.14:

Parametr	Downlink		Uplink	
	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-3,521	-8,652	1,346
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-10,632	-8,652	-4,130
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-11,153	-8,652	-3,837
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-12,484	-8,652	-0,412
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	8,963	0	5,476

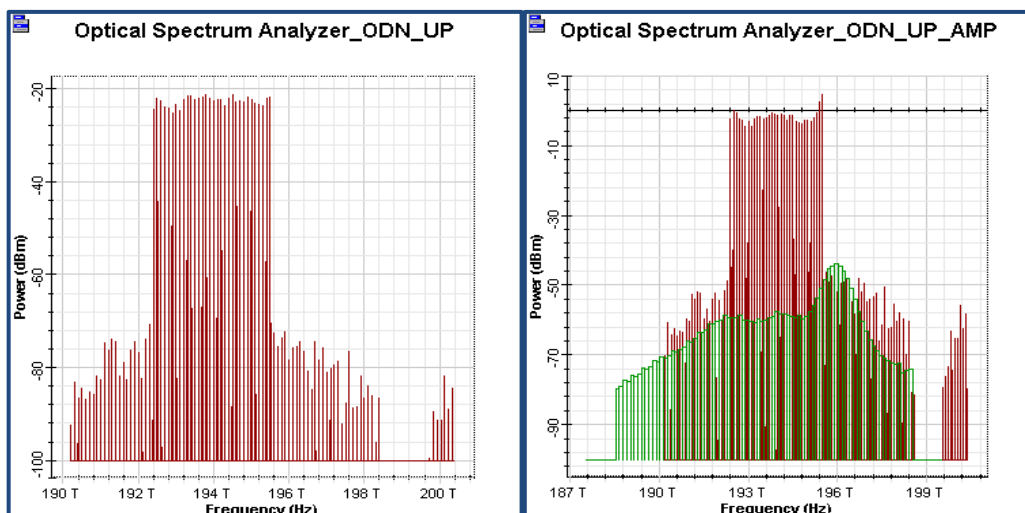
Tab. 8.14: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Na trase downlink se rozdíly výkonových úrovní mezi jednotlivými kanály se už moc nemění. Na trase uplink se zvětšil rozdíl mezi jednotlivými kanály o 0,5 dBm. Přijímaný výkon na trase downlink opět klesl o 1 dBm.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Spektrum za AWG splitterem je stejné jako u trasy 5 km.



Obr. 8.25: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).

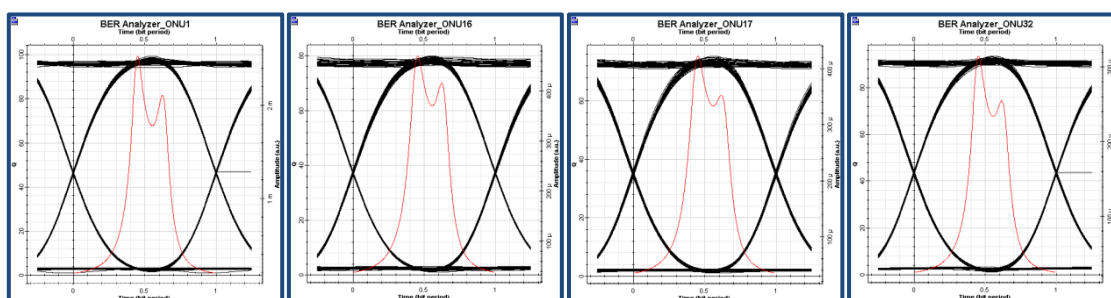


Obr. 8.25: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

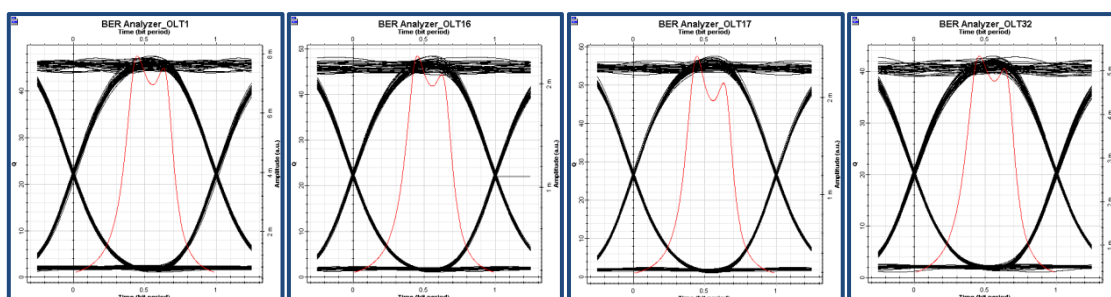
V tabulce 8.15 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Chybovost je opět nulová. Hodnota Q-faktoru klesla hlavně na trase uplink (na 2. kanále o 24).

Parametr	Downlink		Uplink	
	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	99.302	0	47.491
16. kanál	0	79.828	0	48.399
17. kanál	0	75.357	0	57.496
32. kanál	0	93.543	0	42.993

Tab. 8.15: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.26: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.27: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 30 km

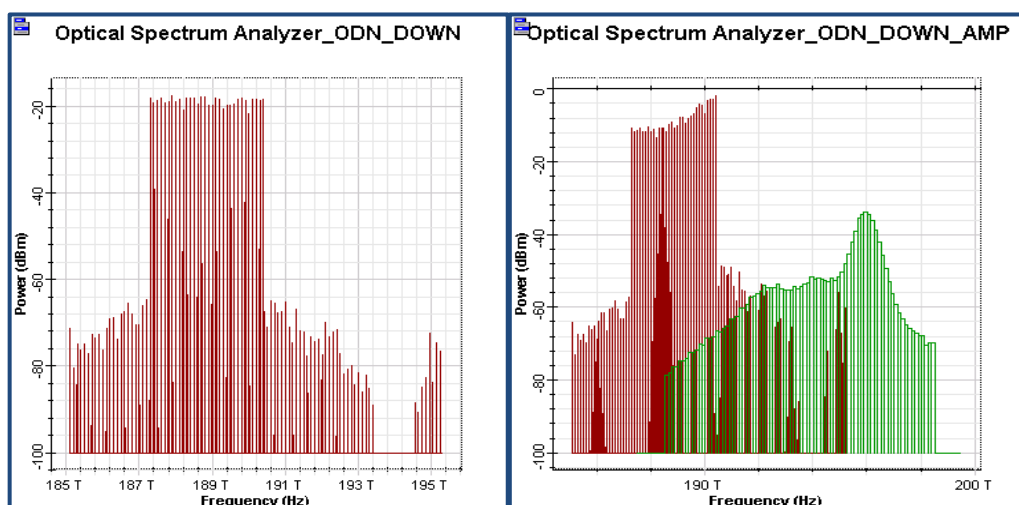
Délka optické trasy byla nastavena na 30 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.16:

Parametr	Downlink		Uplink	
	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-4,690	-8,652	1,364
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-11,746	-8,652	-4,548
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-12,288	-8,652	-4,269
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-13,664	-8,652	-0,488
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	8,974	0	5,912

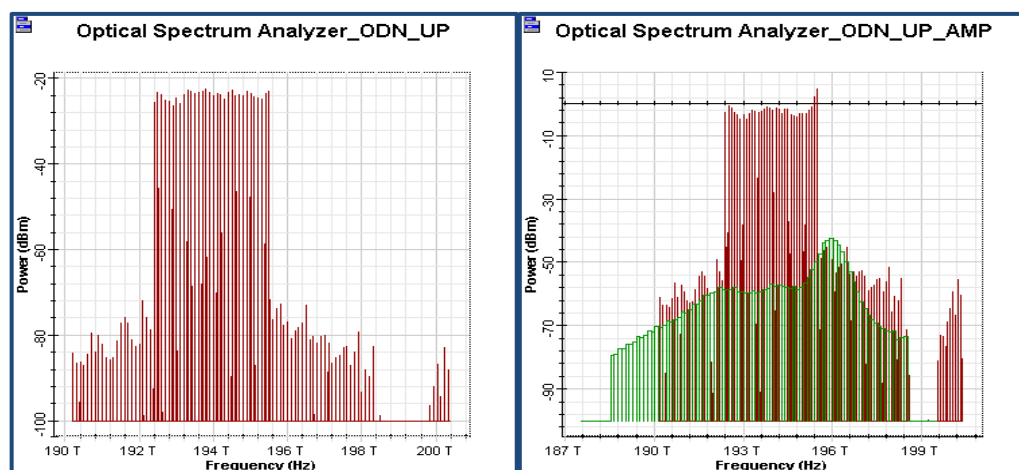
Tab. 8.16: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Maximální odchylka výkonových úrovní na trase se ustálila na hodnotě okolo 9 dBm. Na trase uplink se opět zvýšil rozdíl mezi jednotlivými kanály o 0,5 dBm. Přijímaný výkon na trase downlink opět klesl o 1 dBm. Nejmenší výkonová úroveň byla zaznamenána na 32. kanále ve směru downlink.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Spektrum za AWG splitterem je stejné jako u trasy 5 km.



Obr. 8.28: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).

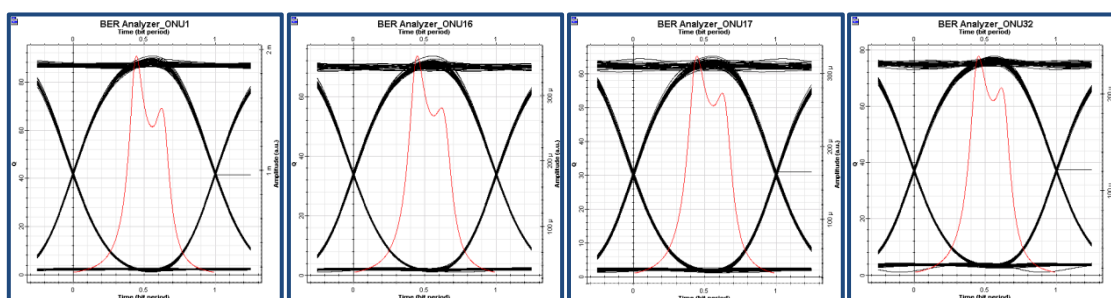


Obr. 8.29: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

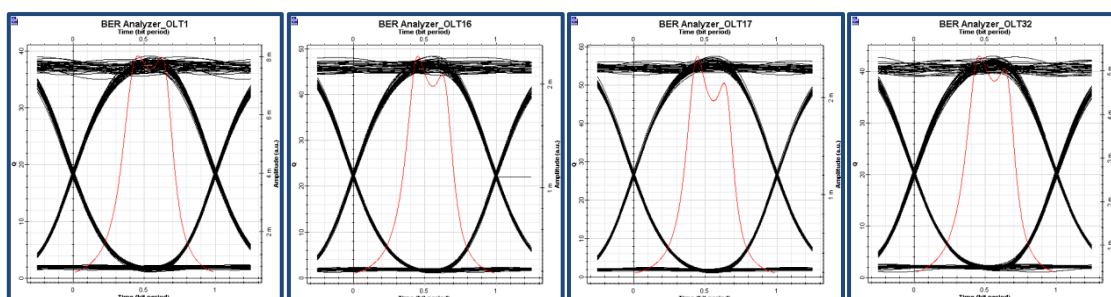
V tabulce 8.17 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Chybovost je opět nulová. Hodnoty Q-faktoru opět klesly v obou směrech, ale kvalita signálu je stále vynikající.

Parametr	Downlink		Uplink	
	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	90,739	0	39,111
16. kanál	0	73,651	0	55,500
17. kanál	0	65,242	0	52,226
32. kanál	0	85,652	0	43,028

Tab. 8.17: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.30: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).

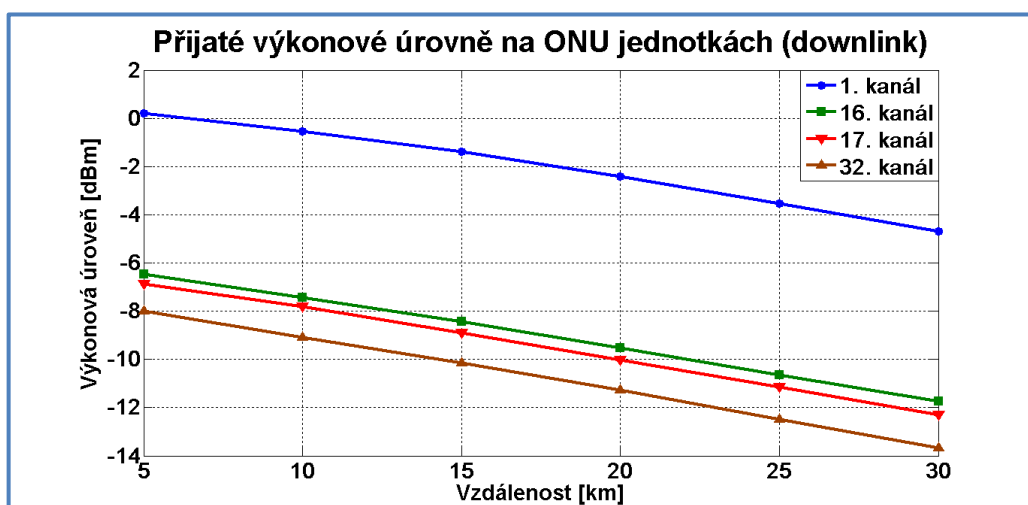


Obr. 8.31: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

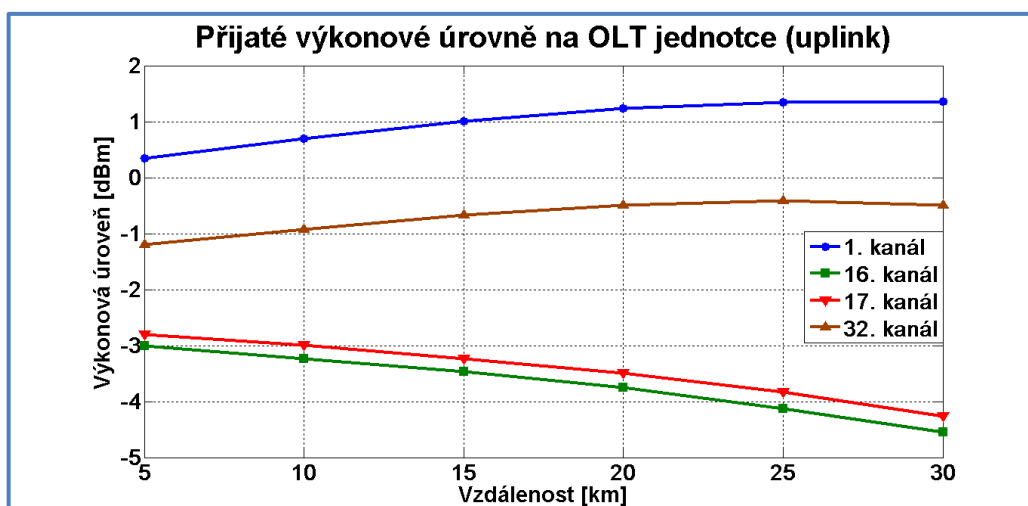
Pokud porovnáme diagramy oka na trase o délce 30 km s trasou o délce 5 km, můžeme si všimnout, že oko je nepatrně přivřené. Jitter a ISI je také vyšší, ale kvalita signálu je stále vynikající (Q-faktor je vyšší než 6).

Grafické zobrazení naměřených hodnot

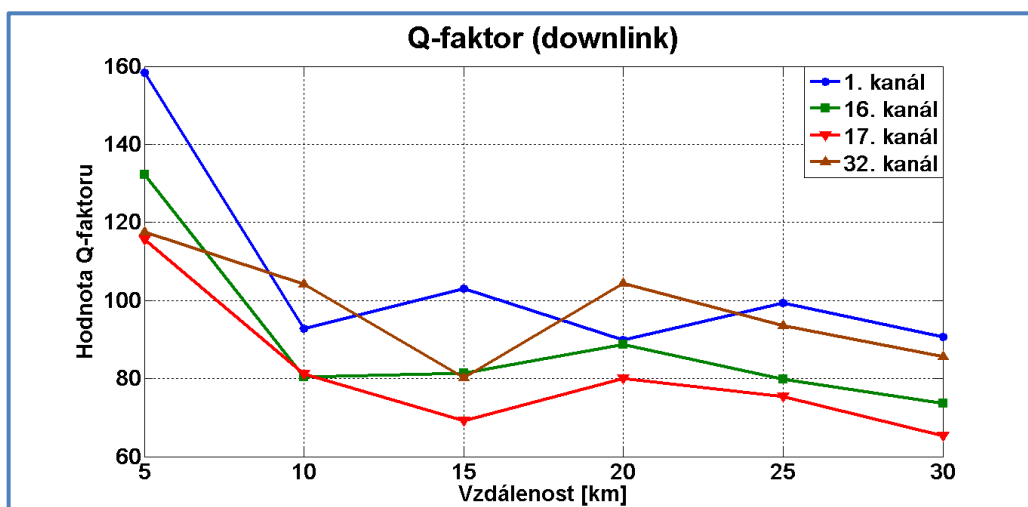
Následující grafy zobrazují přijaté výkonové úrovně na ONU jednotkách a OLT jednotkách, chybovost a Q-faktor pro kanály 1, 16, 17 a 32. Přenosová rychlost byla nastavena na $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ symetricky. Z grafů je patrné, že hodnota Q-faktoru se pohybuje mezi 40 a 160 (v závislosti na vzdálenosti), tudíž tento zesilovač by mohl být použit i na delších optických trasách při zachování Q-faktoru vyššího než je hodnota 6. Pro směr downlink výkonová úroveň klesala vždy okolo 1 dBm. Ve směru uplink s rostoucí délkou trasy klesala výkonová úroveň pomaleji (kanály 16 a 17) nebo dokonce do určité vzdálenosti stoupala (kanály 1 a 32). Také přijaté výkonové úrovně na konci trasy ve směru uplink jsou vyšší, než ve směru downlink - zesilovač EDFA lépe zesiluje nižší výkonové úrovně (ve směru downlink byl použit optický vysílač s výkonem -1 dBm a ve směru uplink byl použit vysílač s výkonem -6 dBm).



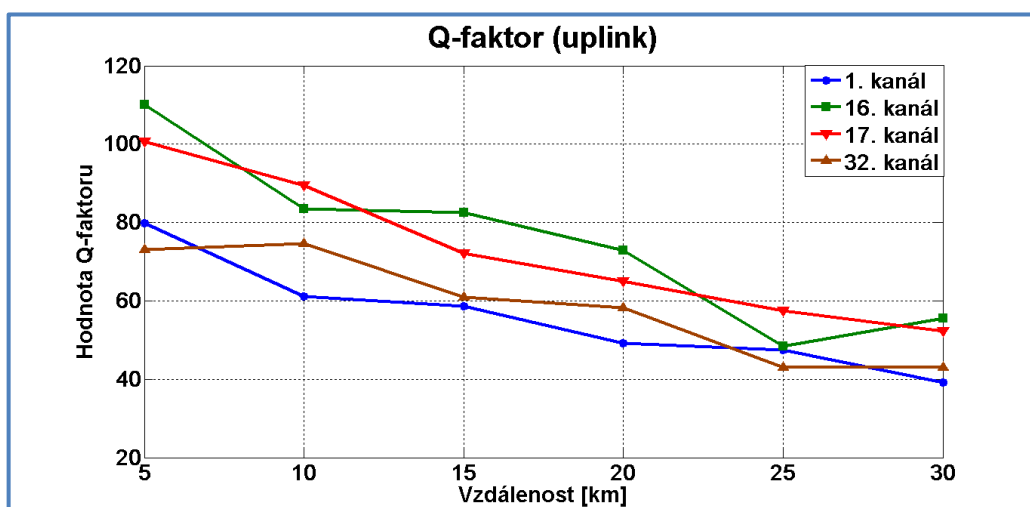
Obr. 8.32: Přijaté výkonové úrovně na ONU jednotkách pro směr downlink.



Obr. 8.33: Přijaté výkonové úrovně na OLT jednotce pro směr uplink.



Obr. 8.34: Hodnoty Q-faktoru na ONU jednotkách pro směr downlink.



Obr. 8.35: Hodnoty Q-faktoru na OLT jednotce pro směr uplink.

8.3.2. Simulace polovodičového optického zesilovače (SOA)

Nastavené parametry zesilovače jsou popsány výše. Optický výkon, chybovost a Q-faktor byly zaznamenány na kanálech 1, 16, 17, 32 v obou směrech. Délka trasy se měnila podle zadání.

Délka trasy: 5 km

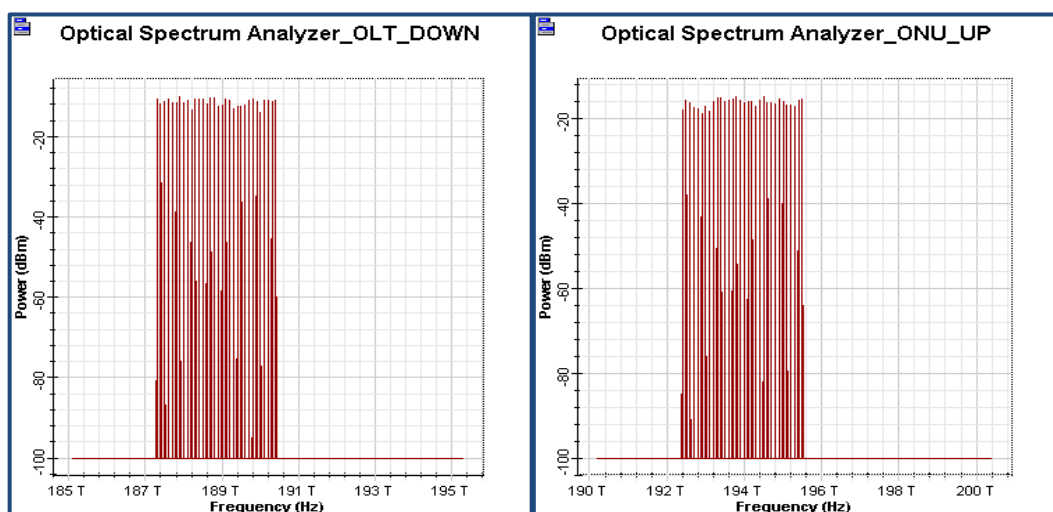
Délka optické trasy byla nastavena na 5 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.18. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonová úroveň na obou vysílačích je stejná, jako v předchozí simulaci u EDFA zesilovače.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-13,666	-8,652	-13,740
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-13,550	-8,652	-13,846
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-13,712	-8,652	-13,841
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-13,513	-8,652	-13,910
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,162	0	0,170

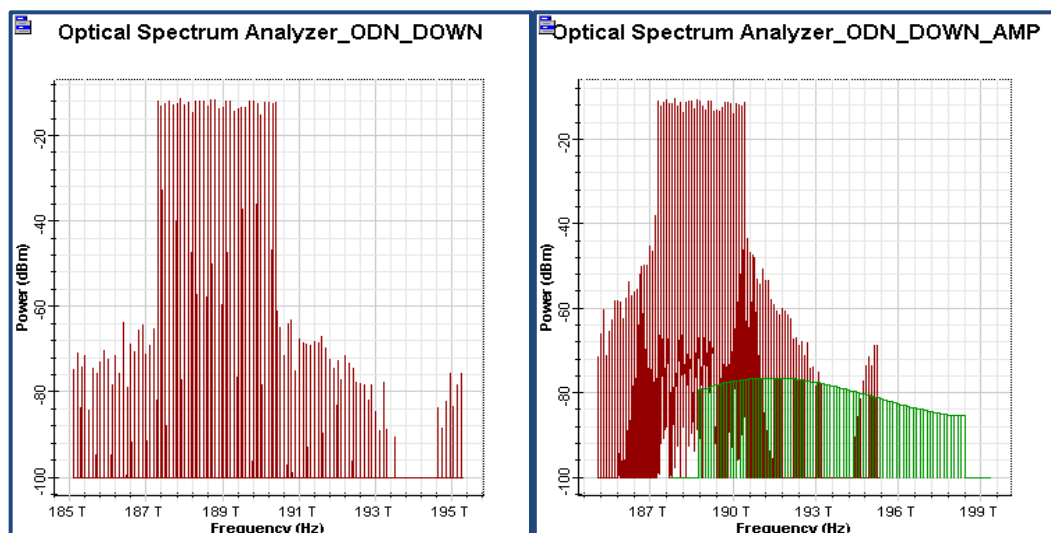
Tab. 8.18: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Přijaté výkonové úrovně pro směr downlink a uplink mají minimální odchylku. Oproti EDFA zesilovači byly před přijímači jednotlivých kanálů zaznamenané menší výkonové úrovně. Tohle je způsobeno nastaveným injekčním proudem na 100 mA.

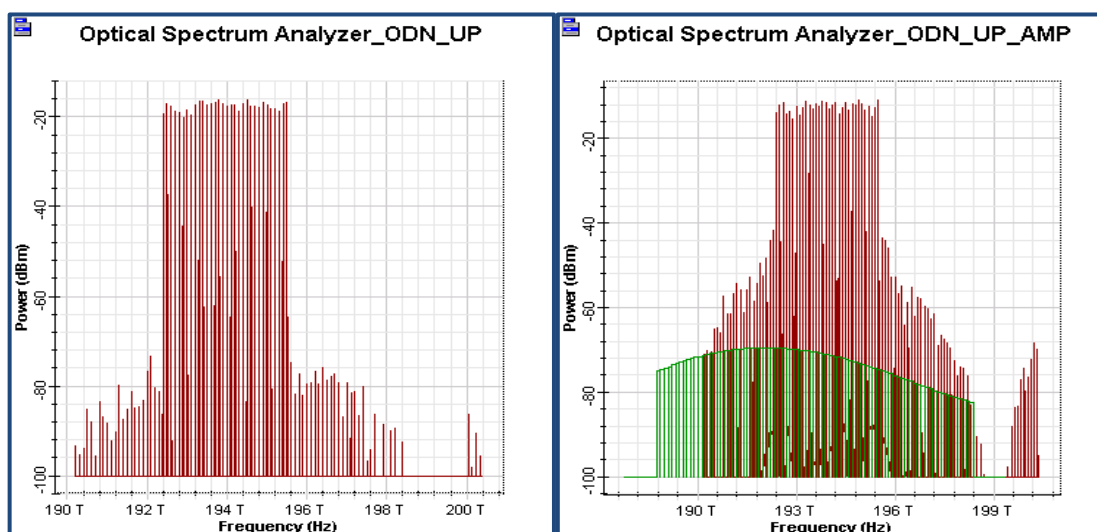
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum za AWG splitterem, spektrum na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Je vidět, že spektrum je polovodičovým optickým zesilovačem zesíleno rovnoměrně v obou směrech. Avšak můžeme si všimnout, že polovodičový optický zesilovač vkládá do optického spektra více nežádoucího šumu než EDFA zesilovač - tenhle nežádoucí jev ovlivňuje chybovost a hodnotu Q-faktoru.



Obr. 8.36: Optické spektrum za AWG splitterem na straně OLT pro směr downlink a optické spektrum za AWG splitterem na straně ONU pro směr uplink (pro další trasy s SOA zesilovačem budou stejné).



Obr. 8.37: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).



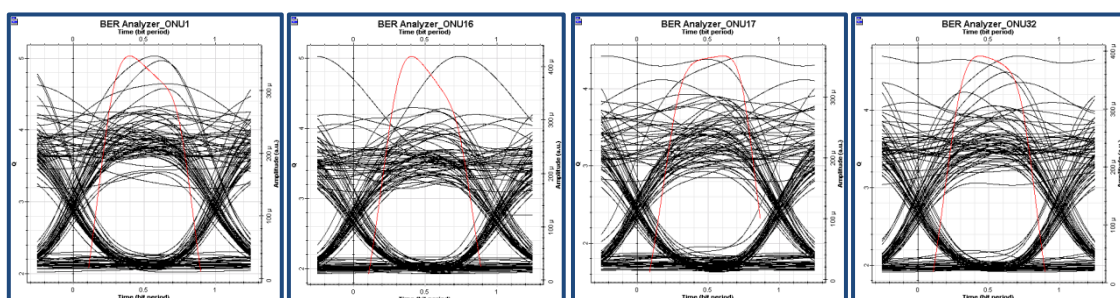
Obr. 8.38: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

V tabulce 8.19 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Můžeme si všimnout, že kvalita signálu a chybovost již není tak dobrá jako u EDFA zesilovače. V optických sítích by měla být chybovost menší nebo rovna hodnotě 10^{-12} . Hodnota Q-faktoru také není větší než 6, ale pohybuje se od 2,5 do 5 - kvalita signálu je tedy malá. Tyhle hodnoty mohou být způsobeny nežádoucím šumem, zejména způsobeným emisí záření. Také útlum způsobený optickou trasou je velmi malý a tudíž do zesilovače vchází stále velký výkon.

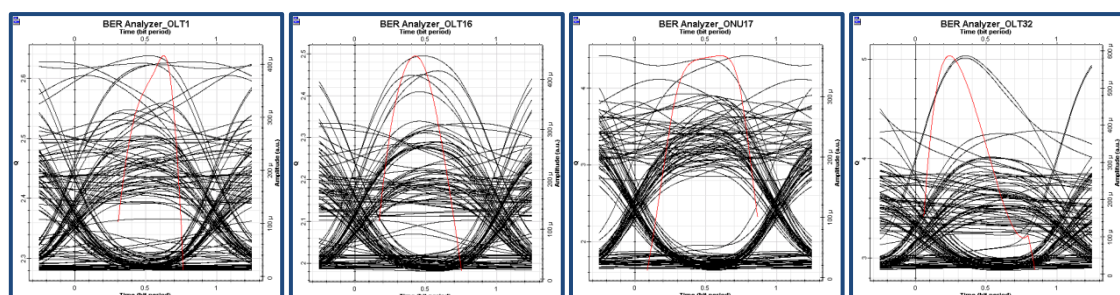
	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	$1,86 \cdot 10^{-7}$	5,031	$4,13 \cdot 10^{-3}$	2,63
16. kanál	$1,91 \cdot 10^{-7}$	5,023	$5,12 \cdot 10^{-3}$	2,49
17. kanál	$3,75 \cdot 10^{-6}$	4,424	$5,24 \cdot 10^{-3}$	2,53
32. kanál	$9,85 \cdot 10^{-7}$	4,69	$2,40 \cdot 10^{-7}$	5,03

Tab. 8.19: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.

Na obrázcích můžeme vidět diagram oka. Signál je velmi degradovaný, jitter a ISI jsou mnohem větší než u EDFA zesilovače. Velikost oka je také menší a občas se může vyskytnout problém rozlišit mezi log "1" a log "0".



Obr. 8.39: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.40: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 10 km

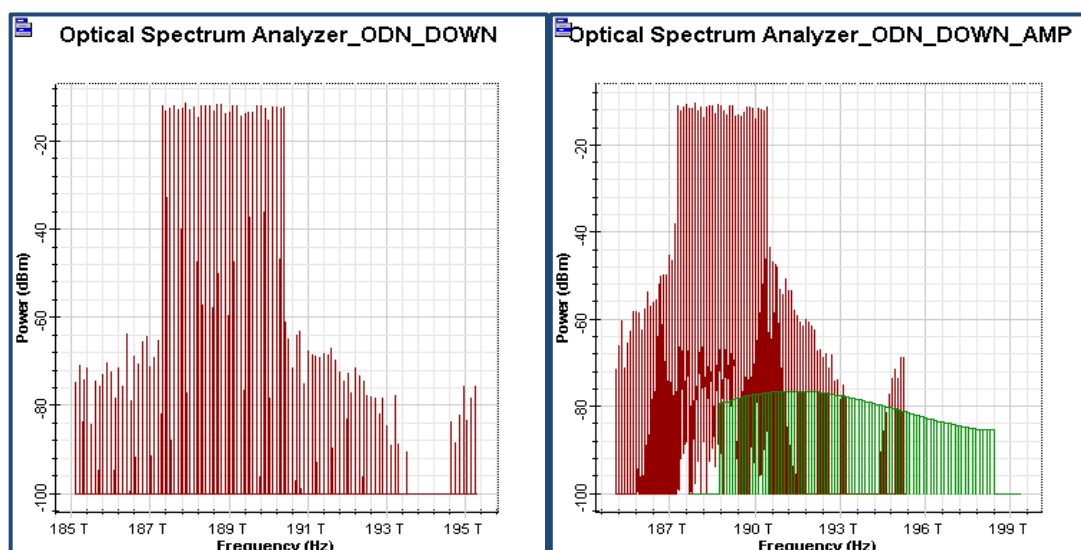
Délka optické trasy byla nastavena na 10 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.20. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonová úroveň na obou vysílačích je stejná, jako v předchozích simulacích.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	- 13,490	-8,652	-14,097
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-13,856	-8,652	-14,049
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-13,469	-8,652	-13,588
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-13,090	-8,652	-13,913
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,766	0	0,509

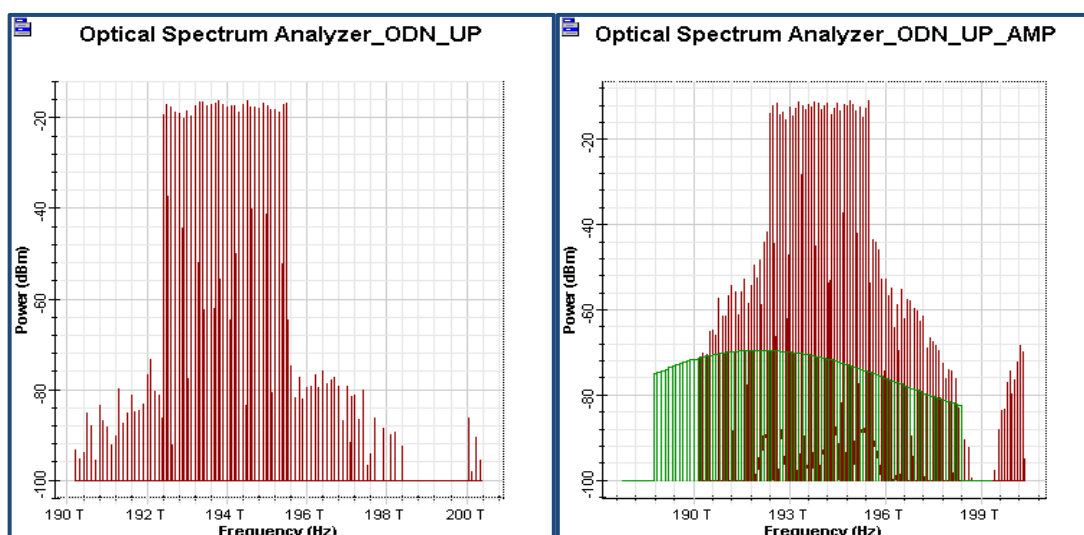
Tab. 8.20: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka jednotlivých výkonových úrovní je vyšší, než u trasy 5 km. Výkonové úrovně téměř vůbec nepoklesly.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Optické spektrum je stále rovnoměrně zesilováno.



Obr. 8.41: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).



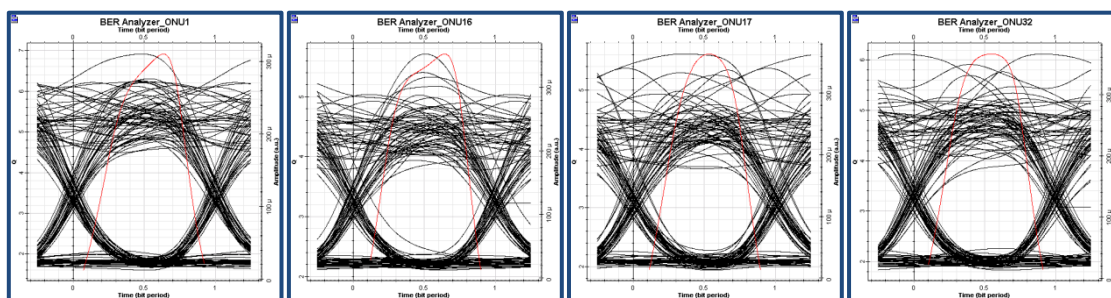
Obr. 8.42: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

V tabulce 8.21 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Chybovost ve směru downlink je na některých kanálech menší (na 1. kanále by se dala považovat za ideální), Q-faktor je také u některých kanálů vyšší než 6, což se dá považovat za kvalitní přenos. Ale ve směru uplink dosáhla chybovost svého maxima - kromě 17. kanálu je chybovost na všech ostatních měřených kanálech 1. Zdá se, že nastavení zesilovače není vhodné pro trasu o délce 10 km.

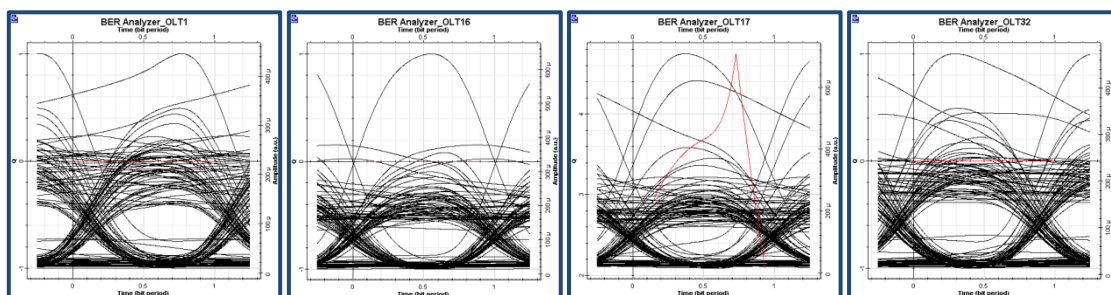
	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	$1.79 \cdot 10^{-12}$	6,913	1	0
16. kanál	$4.20 \cdot 10^{-9}$	5,711	1	0
17. kanál	$7.52 \cdot 10^{-9}$	5,613	$1.00 \cdot 10^{-6}$	4,74
32. kanál	$3.64 \cdot 10^{-10}$	6,119	1	0

Tab. 8.21: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.

Na obrázcích můžeme vidět diagram oka. Ve směru downlink má signál lepší podobu než na trase 5 km, ale na ve směru uplink je signál ještě více degradován a díky tomu je chybovost na některých kanálech rovna 1.



Obr. 8.43: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy)



Obr. 8.44: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy)

Délka trasy: 15 km

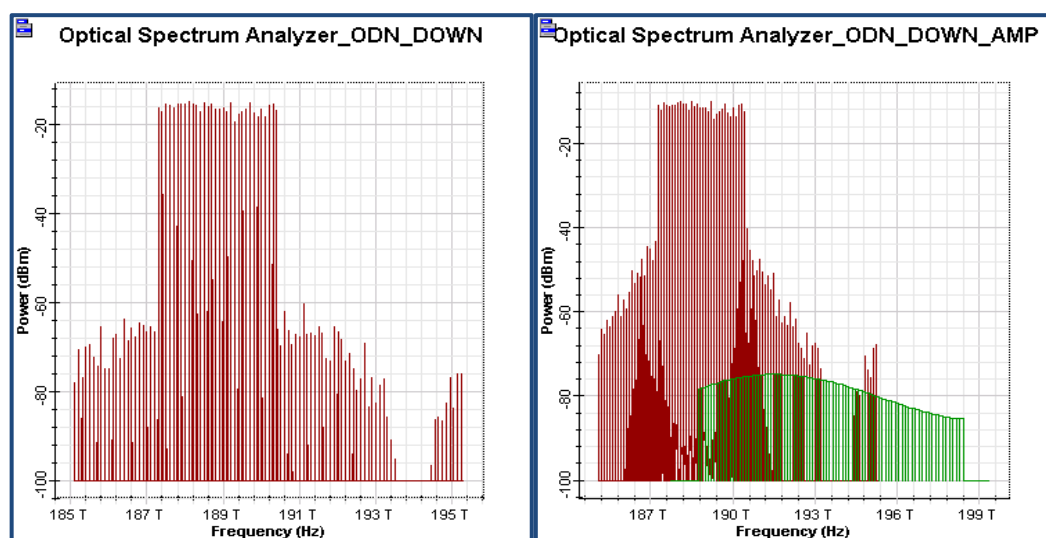
Délka optické trasy byla nastavena na 15 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.22. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonová úroveň na obou vysílačích je stále stejná.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-13,827	-8,652	-13,951
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-13,581	-8,652	-14,022
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-13,716	-8,652	-13,901
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-13,353	-8,652	-14,093
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,474	0	0,192

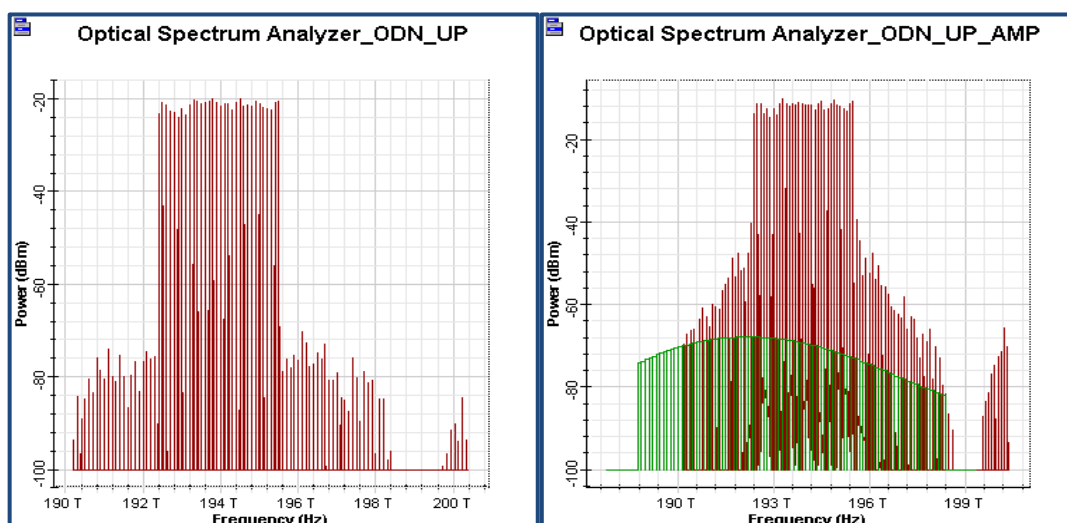
Tab. 8.22: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka jednotlivých výkonových úrovní se stále drží pod 1 dBm a je ještě menší než na trase 10 km. Výkonové úrovně taktéž také zůstávají na stejných hodnotách.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Optické spektrum je stále rovnoměrně zesilováno za polovodičovým optickým zesilovačem i po 20 km.



Obr. 8.45: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink)



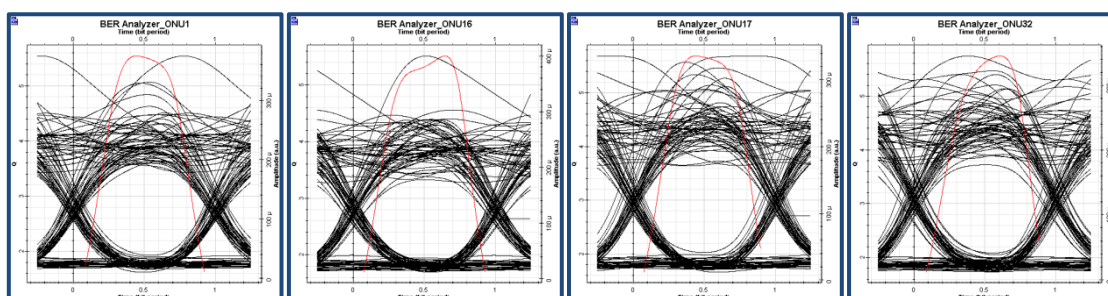
Obr. 8.46: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

Hodnoty chybovosti a Q-faktoru jsou zaznamenány v tabulce 8.23. Chybovost je větší než na trase 10 km ve směru downlink a rovněž kvalita je také horší. Ve směru uplink je opět chybovost větší než ve směru downlink.

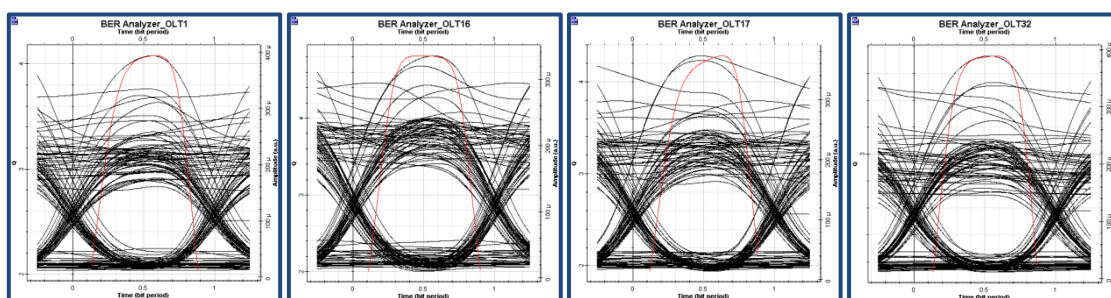
	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	$1.10 \cdot 10^{-8}$	5,54	$1.66 \cdot 10^{-5}$	4,07
16. kanál	$1.29 \cdot 10^{-8}$	5,51	$6,11 \cdot 10^{-7}$	4,81
17. kanál	$4,79 \cdot 10^{-9}$	5,68	$7,07 \cdot 10^{-7}$	4,28
32. kanál	$3.62 \cdot 10^{-9}$	5,74	$6,97 \cdot 10^{-5}$	3,72

Tab. 8.23: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.

Na obrázcích můžeme vidět diagram oka. Je vidět, že signál ve směru downlink je horší než na trase 10 km. Signál ve směru uplink je naopak lepší než na trase 10 km.



Obr. 8.46: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.47: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 20 km

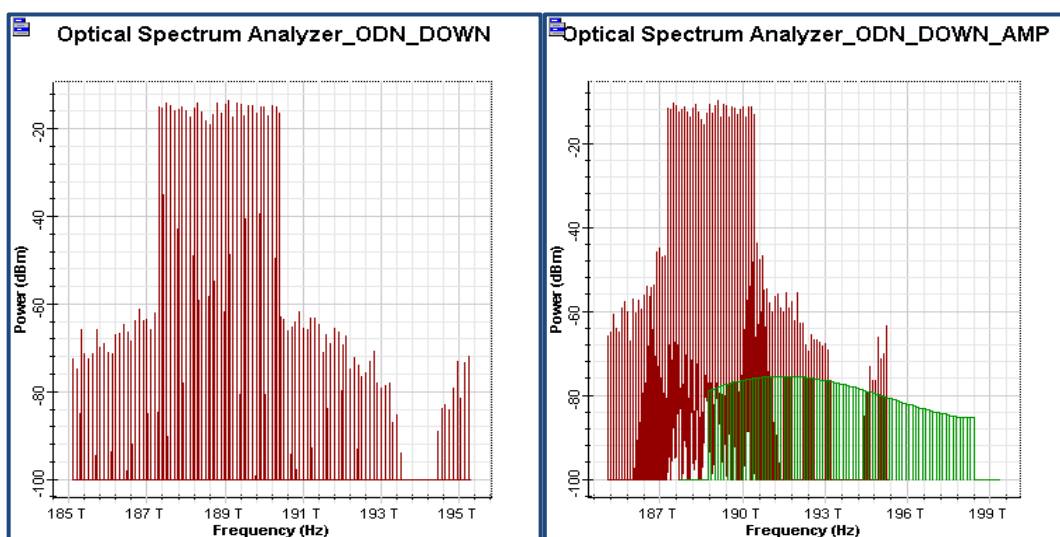
Délka optické trasy byla nastavena na 20 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.24. Výkonové úrovně na vysílačích mají stejné výkonové úrovně, jako u předchozích tras. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-13,870	-8,652	-14,239
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-13,855	-8,652	-14,078
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-13,478	-8,652	-14,281
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-13,394	-8,652	-13,935
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,476	0	0,350

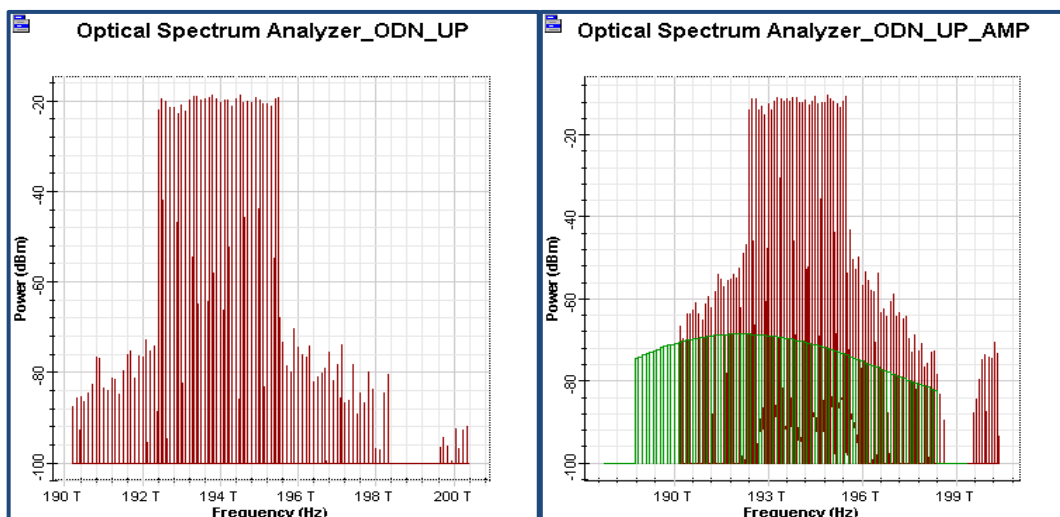
Tab. 8.24: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka jednotlivých výkonových úrovní se stále drží pod 1 dBm. Stejně tak výkonové úrovně zůstávají na stejných hodnotách jako u předchozí trasy.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Optické spektrum je stále rovnoměrně zesilováno za polovodičovým optickým zesilovačem. Při porovnání optického spektra na konci trasy s optickým spektrem na začátku trasy můžeme si všimnout mírného útlumu, který se pohybuje okolo 4 dBm.



Obr. 8.48: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).



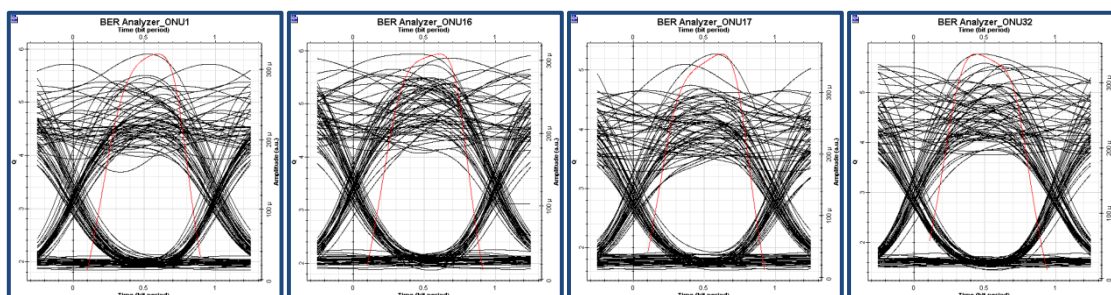
Obr. 8.49: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink)

Hodnoty chybovosti a Q-faktoru jsou zaznamenány v tabulce 8.25. Chybovosti na jednotlivých kanálech zůstávají téměř na stejných hodnotách, jako na trase 15 km.

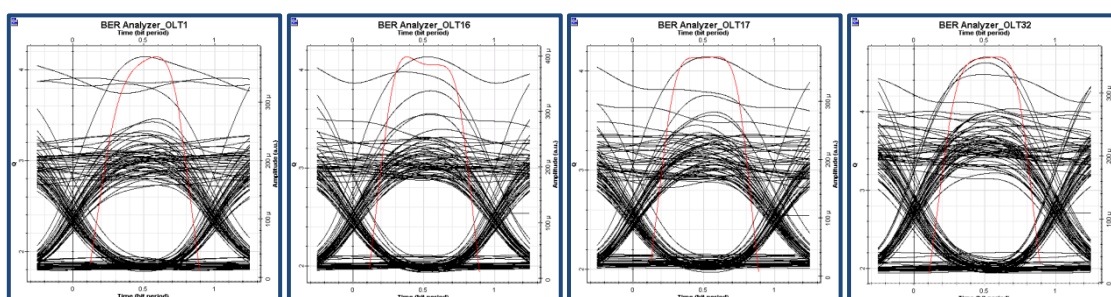
	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	$1.26 \cdot 10^{-9}$	5,90	$1.15 \cdot 10^{-5}$	4,14
16. kanál	$1.05 \cdot 10^{-9}$	5,93	$1,25 \cdot 10^{-5}$	4,13
17. kanál	$5,06 \cdot 10^{-8}$	5,27	$1,23 \cdot 10^{-5}$	4,14
32. kanál	$2,76 \cdot 10^{-9}$	5,76	$9,82 \cdot 10^{-7}$	4,69

Tab. 8.25: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.

Na obrázcích můžeme vidět diagram oka. Je vidět, že signál ve směru downlink je horší než na trase 10 km. Signál ve směru uplink je naopak lepší než na trase 10 km.



Obr. 8.50: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.51: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 25 km

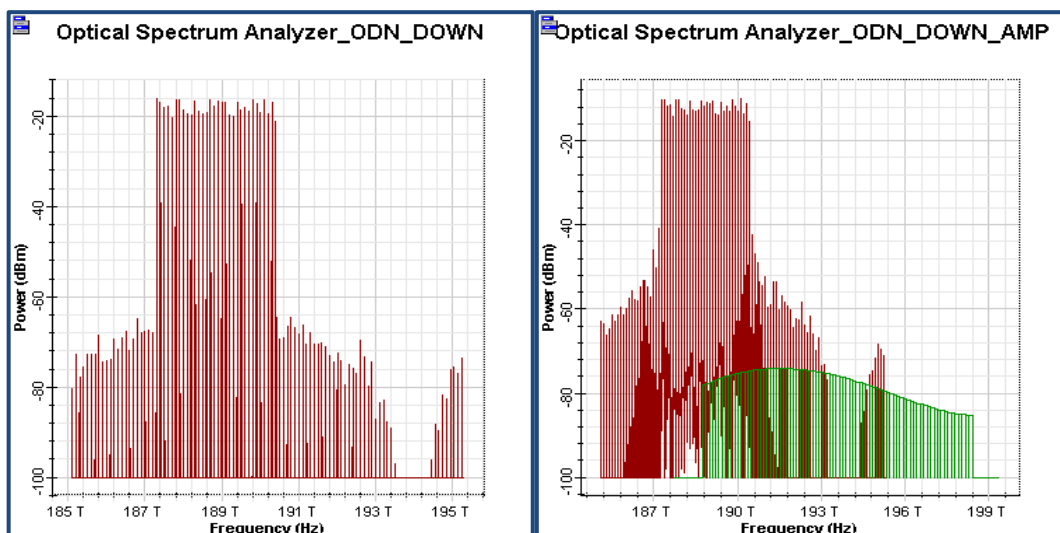
Délka optické trasy byla nastavena na 25 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.26. Výkonové úrovně na vysílačích mají stejné výkonové úrovně, jako u předchozích tras. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-13,748	-8,652	-14,261
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-13,740	-8,652	-14,270
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-13,581	-8,652	-13,999
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-13,567	-8,652	-14,023
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,181	0	0,271

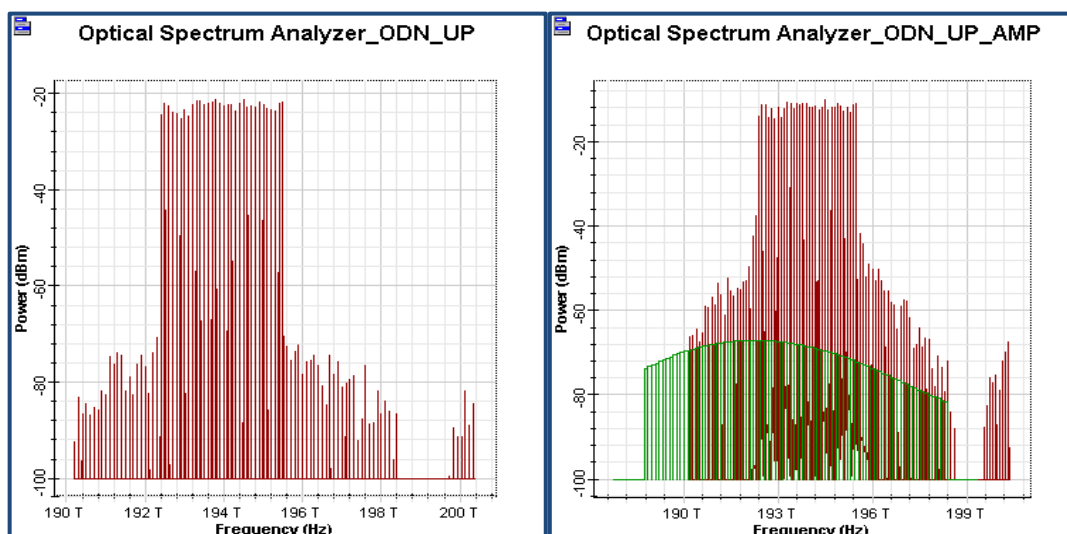
Tab. 8.26: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka jednotlivých výkonových úrovní se pohybuje okolo 0,2 dBm, což je lepší výsledek než na předchozích trasách.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Optické spektrum je stále rovnoměrně zesilováno za polovodičovým optickým zesilovačem. Při porovnání optického spektra na konci trasy s optickým spektrem na začátku trasy můžeme si všimnout mírného útlumu, který způsobuje daná trasa (okolo 5 dBm).



Obr. 8.52: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).



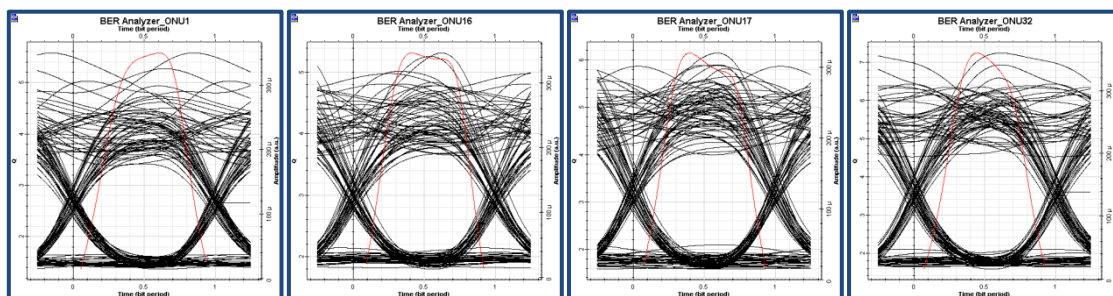
Obr. 8.53: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

V tabulce 8.27 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Hodnoty chybovosti a Q-faktoru se podstatně zlepšily oproti trase 20 km. Hodnoty Q-faktoru jsou dokonce na některých kanálech vyšší než 6, což značí vynikající kvalitu signálu. Ve směru uplink také došlo ke zlepšení - hodnota Q-faktoru se pohybuje okolo hodnoty 5.

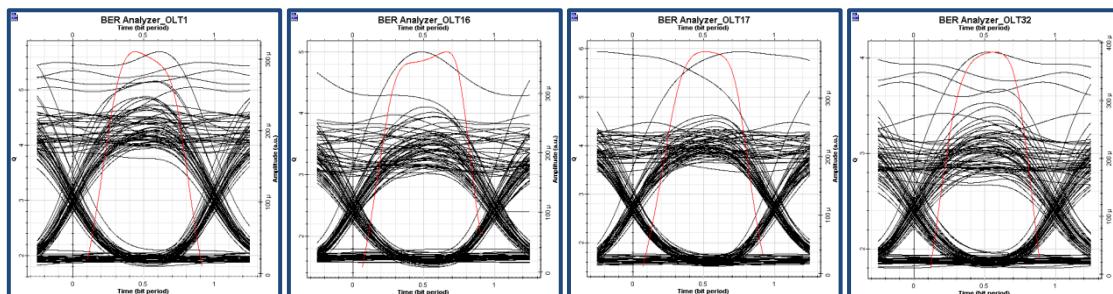
	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	$8.97 \cdot 10^{-9}$	5,57	$4.47 \cdot 10^{-9}$	5,69
16. kanál	$3.86 \cdot 10^{-8}$	5,31	$2.12 \cdot 10^{-7}$	4,99
17. kanál	$3.13 \cdot 10^{-10}$	6,14	$1.09 \cdot 10^{-9}$	5,93
32. kanál	$1.73 \cdot 10^{-13}$	7,23	$1.69 \cdot 10^{-5}$	4,05

Tab. 8.27: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.

Na obrázcích 8.54 a 8.55 můžeme vidět diagram oka.



Obr. 8.54: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.55: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 30 km

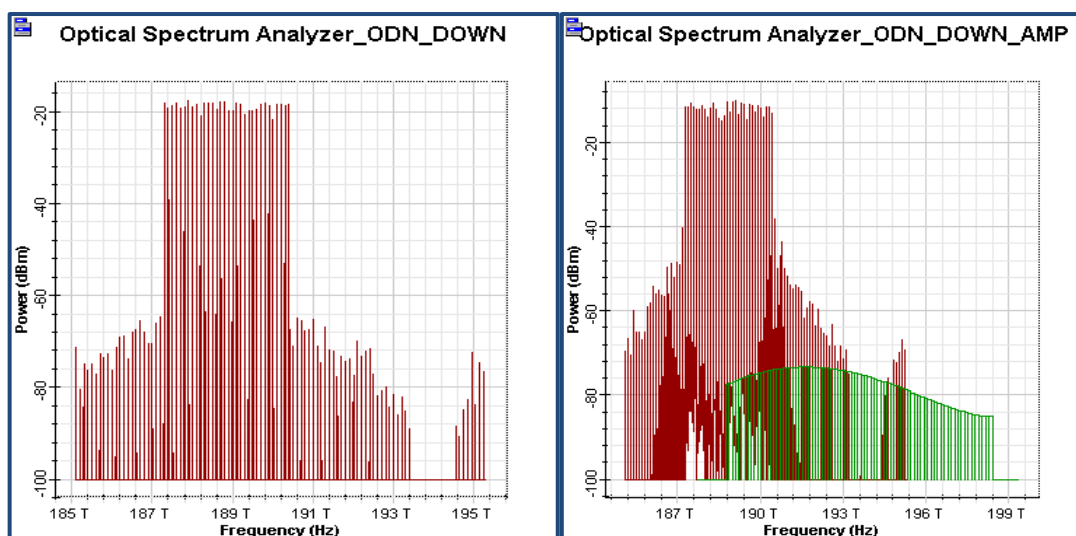
Délka optické trasy byla nastavena na 30 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.28. Výkonové úrovně na vysílačích mají stejné výkonové úrovně, jako u předchozích tras. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-13,685	-8,652	-14,188
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-13,842	-8,652	-14,053
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-13,498	-8,652	-14,083
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-13,432	-8,652	-14,238
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,410	0	0,135

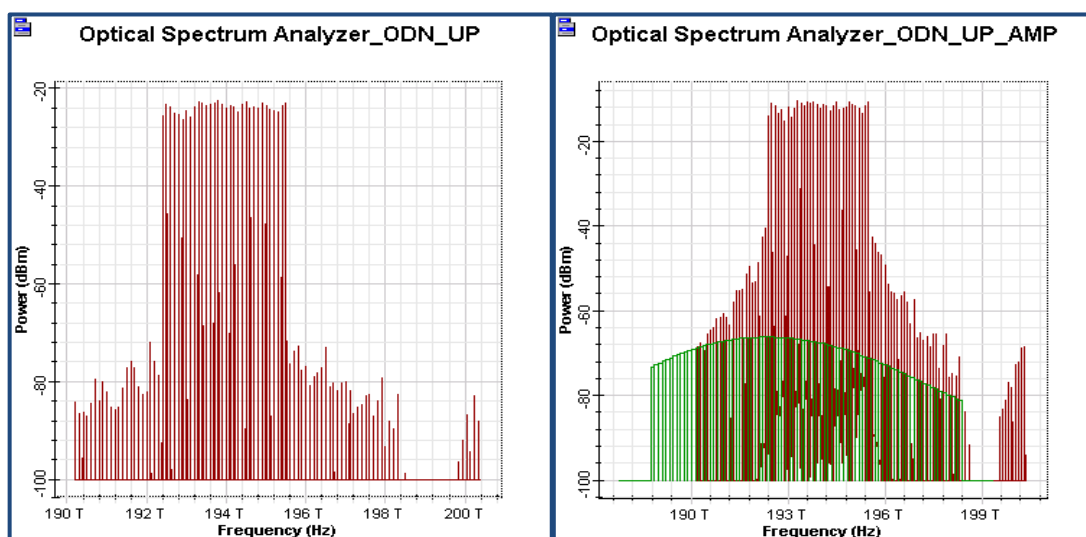
Tab. 8.28: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka výkonových úrovní na jednotlivých kanálech je stále maximálně 0,5 dBm.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - na konci optické trasy před zesilovačem a spektrum na konci optické trasy za zesilovačem. Optické spektrum je stále rovnoměrně zesilováno za polovodičovým optickým zesilovačem. Při porovnání optického spektra na konci trasy s optickým spektrem na začátku trasy můžeme si všimnout útlumu okolo 7 dBm.



Obr. 8.56: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (downlink).



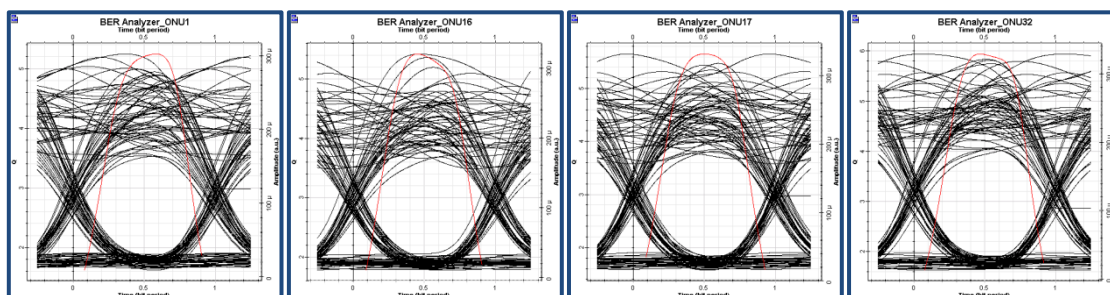
Obr. 8.57: Optické spektrum na konci přenosové trasy před a za zesilovačem (uplink).

Hodnoty chybovosti a Q-faktoru jsou zaznamenány v tabulce 8.29. Hodnoty chybovosti a Q-faktoru se o něco zhoršily oproti trase 25 km. Ve směru uplink došlo ke zlepšení kvality signálu.

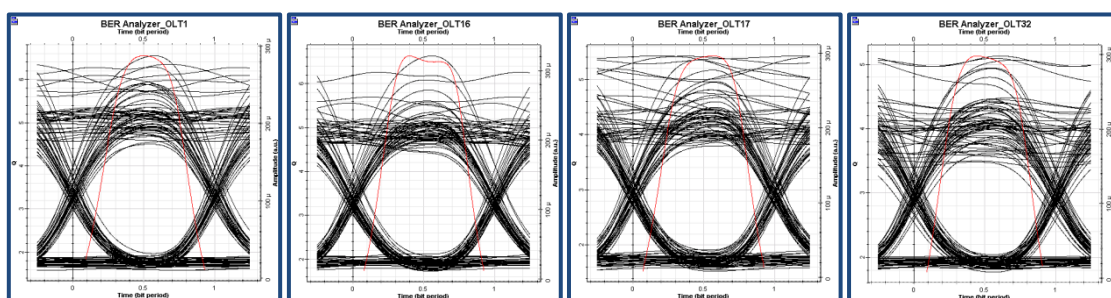
	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	$5.81 \cdot 10^{-8}$	5,24	$2.20 \cdot 10^{-11}$	6,54
16. kanál	$2.11 \cdot 10^{-8}$	5,42	$1.27 \cdot 10^{-11}$	6,63
17. kanál	$5.90 \cdot 10^{-9}$	5,65	$2.26 \cdot 10^{-8}$	5,42
32. kanál	$1.04 \cdot 10^{-9}$	5,94	$1.04 \cdot 10^{-7}$	5,12

Tab. 8.29: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.

Na obrázcích můžeme vidět diagram oka. Signál ve směru downlink je o něco horší, než na trase 25 km. Ve směru uplink je signál lepší.



Obr. 8.58: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



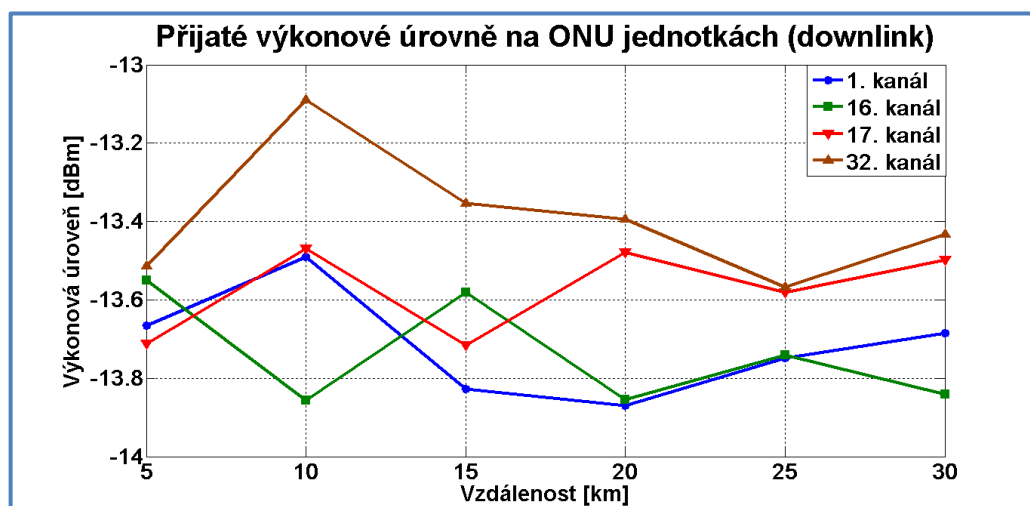
Obr. 8.59: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Pokud porovnáme diagramy oka na trase o délce 30 km s trasou o délce 5 km, můžeme si všimnout, že na trase 30 km došlo k určitému zlepšení kvality signálu. Nicméně kvalita a chybovost signálu jsou stále nedostačující pro bezchybnou optickou komunikaci- požadovaná chybovost musí být nižší než 10^{-12} a Q-faktor musí být vyšší než 6. Tyto podmínky byly splněny pouze u určitých tras a na určitých kanálech.

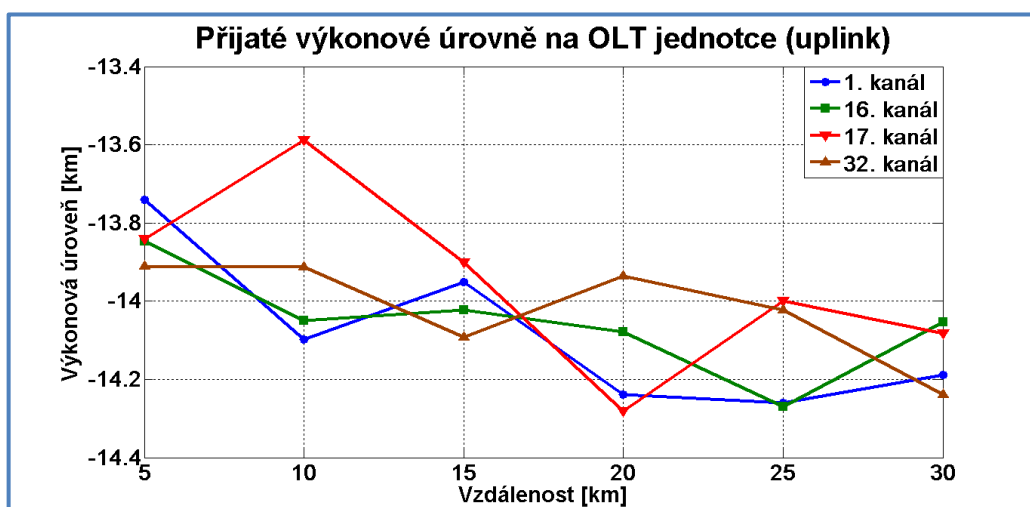
Grafické zobrazení naměřených hodnot

Následující grafy zobrazují přijaté výkonové úrovně na ONU jednotkách a OLT jednotkách, chybovost a Q-faktor pro kanály 1, 16, 17 a 32. Přenosová rychlost byla nastavena na $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ symetricky. Z grafů je patrné, že hodnota Q-faktoru se pohybuje mezi hodnotami 2 a 7 (v závislosti na vzdálenosti). S rostoucí vzdáleností rostla hodnota Q-faktoru a klesala chybovost. Tudíž, aby bylo dosaženo vyšší hodnoty Q-faktoru a chybovosti bylo by nutné snížit výkon před zesilovačem (např. delší optická trasa, která by způsobila větší útlum), snížit přenosovou rychlost nebo snížit hodnotu injekčního proudu (důsledkem by však bylo menší zesílení).

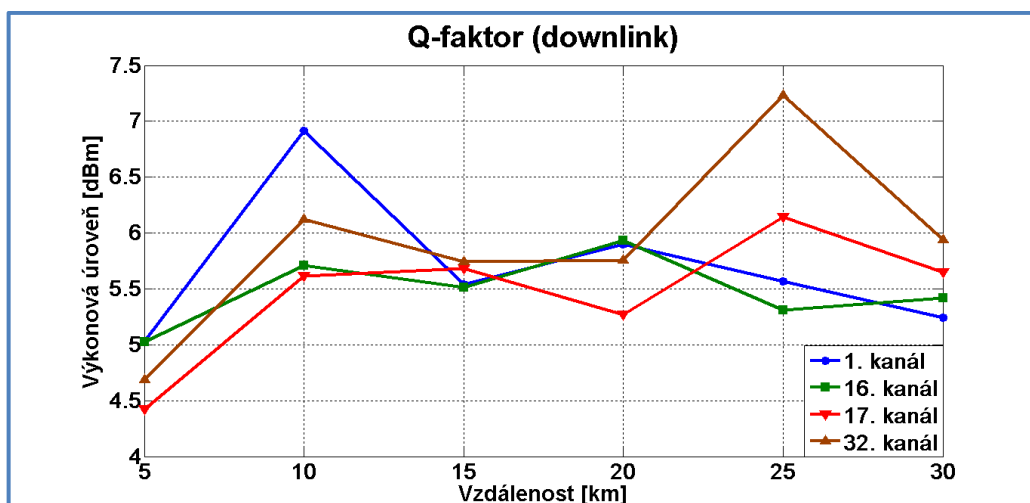
Naměřený výkon pro směr downlink byl stále na stejných hodnotách a pro směr uplink klesal minimálně - optický polovodičový zesilovač lépe zesiluje nižší výkonové úrovně.



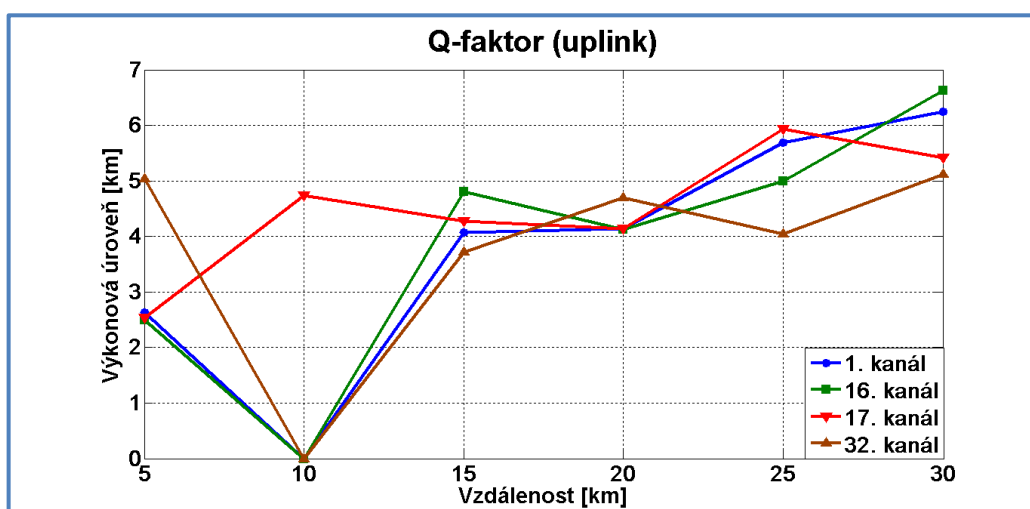
Obr. 8.60: Přijaté výkonové úrovně na ONU jednotkách pro směr downlink.



Obr. 8.61: Přijaté výkonové úrovně na OLT jednotce pro směr uplink.



Obr. 8.62: Hodnoty Q-faktoru na ONU jednotkách pro směr downlink.



Obr. 8.63: Hodnoty Q-faktoru na OLT jednotce pro směr uplink.

8.3.3. Simulace Ramanova zesilovače

Nastavené parametry zesilovače jsou popsány výše. Optický výkon, chybovost a Q-faktor byly zaznamenány na kanálech 1, 16, 17, 32 v obou směrech. Délka trasy se měnila podle zadání.

Délka trasy: 5 km

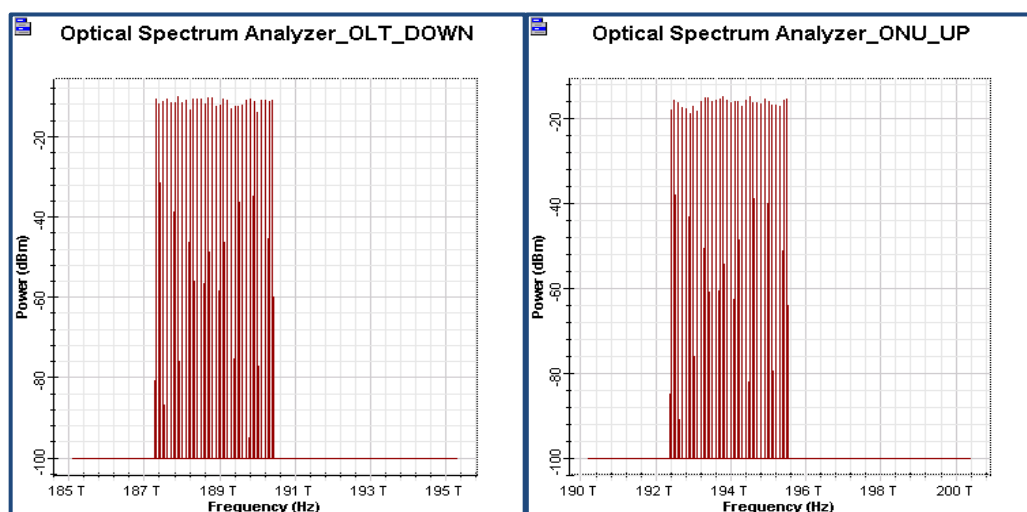
Délka optické trasy byla nastavena na 5 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.30. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonové úrovně za vysílačem zůstávají stejné.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-11,708	-8,652	-15,710
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-11,378	-8,652	-15,316
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-11,294	-8,652	-15,293
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-11,440	-8,652	-15,678
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,414	0	0,417

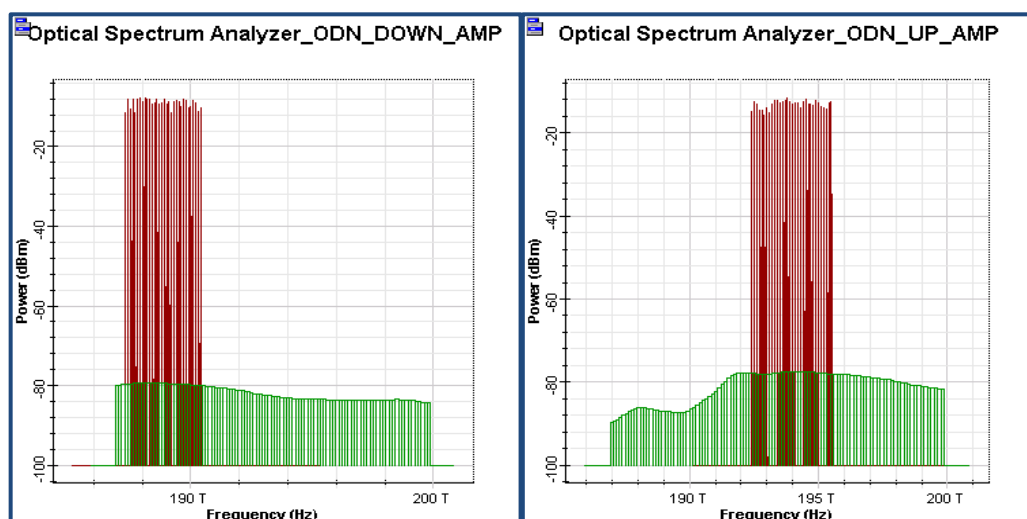
Tab. 8.30: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Přijaté výkonové úrovně mají minimální odchylku (maximálně 0,5 dBm).

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum za AWG splitterem, spektrum na konci optické trasy po zesílení. Z obrázků je patrné, že jednotlivé kanály mají za AWG splitterem stejné výkonové úrovně. Výkonové rozdíly mezi nimi se na konci trasy téměř nezměnily. Také Ramanův zesilovač přidává k zesílení optický šum, který je však menší než u EDFA a SOA zesilovače (vyznačen zeleně).



Obr. 8.64: Optické spektrum za AWG splitterem na straně OLT pro směr downlink a optické spektrum za AWG splitterem na straně ONU pro směr uplink (pro další trasy s Ramanovým zesilovačem budou stejné).

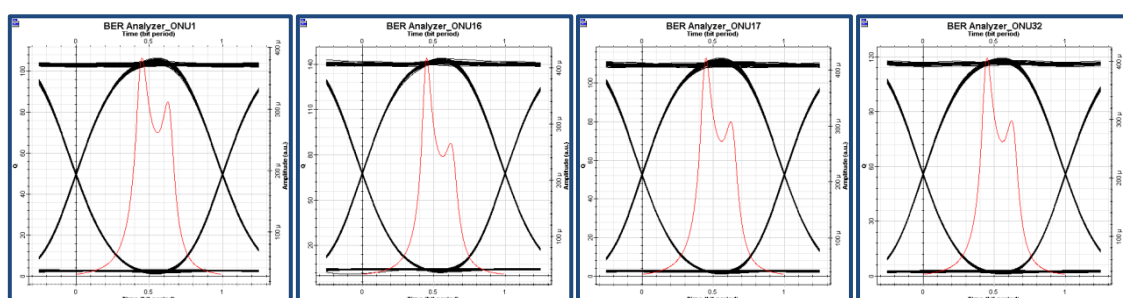


Obr. 8.65: Optické spektrum na konci přenosové trasy na straně ONU pro směr downlink a optické spektrum na konci přenosové trasy na straně OLT pro směr uplink.

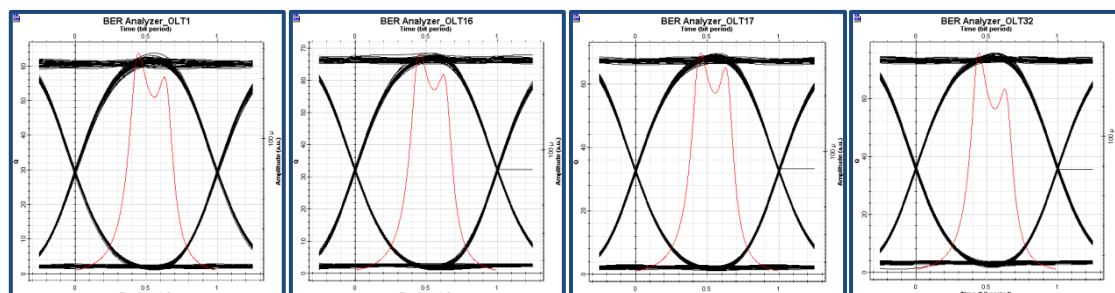
Hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech jsou zaznamenány v tabulce 8.31. Je vidět, že chybovost na dané optické trase s použitým zesilovačem je nulová, stejně tak hodnota Q-faktoru je vyšší než 6, což nám zaručuje bezchybný přenos.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	106,505	0	63,718
16. kanál	0	144,086	0	68,465
17. kanál	0	112,878	0	69,611
32. kanál	0	119,403	0	75,806

Tab. 8.31: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.66: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.67: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 10 km

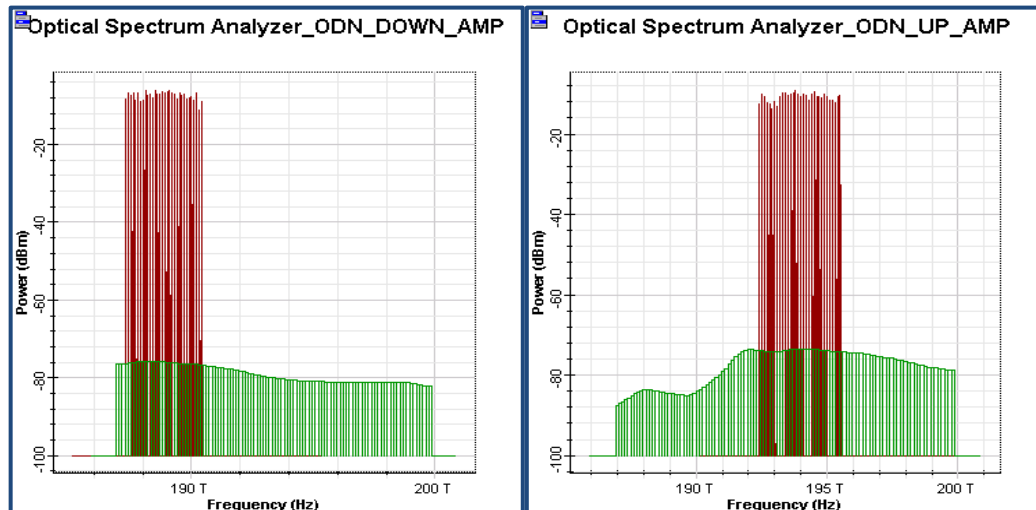
Délka optické trasy byla nastavena na 10 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.32. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonové úrovně za vysílačem zůstávají stejné.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-10,427	-8,652	-13,575
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-9,794	-8,652	-12,867
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-9,688	-8,652	-12,827
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-9,944	-8,652	-13,518
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,739	0	0,748

Tab. 8.32: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka mezi výkonovými úrovněmi se mírně zvětšila, ale stále je pod 1 dBm. Oproti trase 5 km byly zaznamenány vyšší výkonové úrovně (až o 1,5 dBm), i když je trasa delší. U Ramanova zesilovače (typ DRA) záleží nejen na výkonu čerpacího zdroje, ale také na délce trasy, ve které probíhá zesílení.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy po zesílení. Výkonové rozdíly mezi jednotlivými kanály jsou stále minimální. Také Ramanův zesilovač přidává k zesílení optický šum, který je už větší, než v případě trasy s délkou 5 km, avšak stále je menší než u EDFA a SOA zesilovače (vyznačen zeleně).

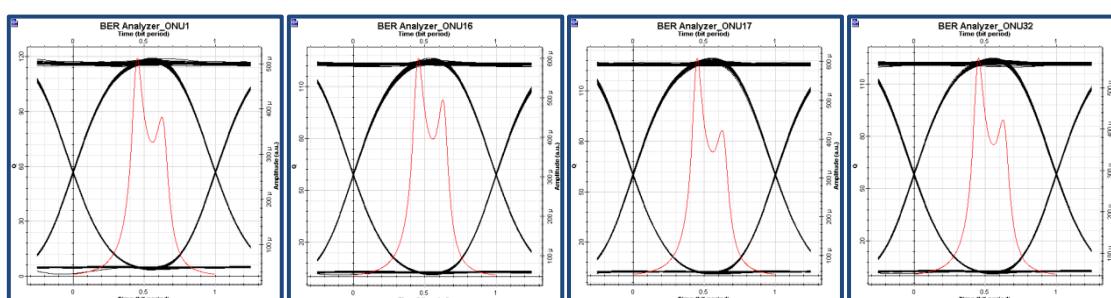


Obr. 8.68: Optické spektrum na konci přenosové trasy na straně ONU pro směr downlink a optické spektrum na konci přenosové trasy na straně OLT pro směr uplink.

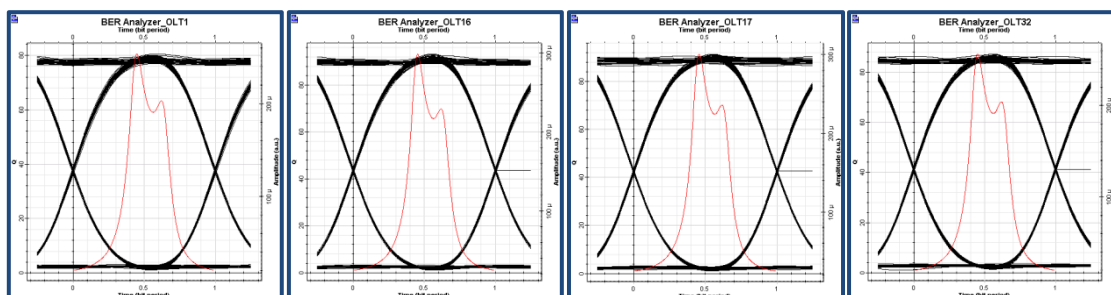
Hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech jsou zaznamenány v tabulce 8.33. Chybovost je stále všude nulová a hodnota Q-faktoru je vyšší než 6. Hodnoty Q-faktoru se oproti trase 5 km zvýšily (ve směru uplink až o 20) - může to být dáno vyšším zesílením signálu a tím vyšším odstupem signálu od šumu.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	119,297	0	80,419
16. kanál	0	126,460	0	93,272
17. kanál	0	129,381	0	91,369
32. kanál	0	124,969	0	87,143

Tab. 8.33: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.69: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.70: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 15 km

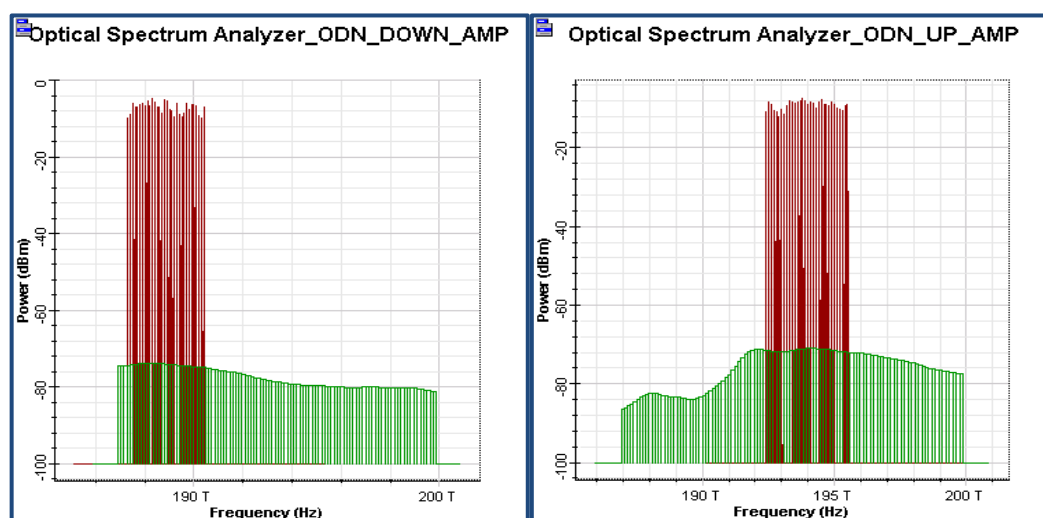
Délka optické trasy byla nastavena na 15 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.34. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonové úrovně za vysílačem zůstávají stejné.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-9,664	-8,652	-12,127
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-8,795	-8,652	-11,172
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-8,672	-8,652	-11,118
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-9,011	-8,652	-12,048
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,992	0	1,009

Tab. 8.34: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka mezi naměřenými výkonovými úrovněmi se opět zvětšila - ve směru uplink už přesahuje 1 dBm. Výkonové úrovně oproti předchozí trase jsou opět vyšší (až o 1,5 dBm), i když je trasa delší. U Ramanova zesilovače (typ DRA) záleží nejen na výkonu čerpacího zdroje, ale také na délce trasy, ve které probíhá zesílení.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy po zesílení. Výkonové rozdíly mezi jednotlivými kanály jsou již větší než u předchozích tras. Také Ramanův zesilovač přidává k zesílení optický šum, který je opět větší, než v případě trasy s délkou 10 km, avšak stále je menší než u EDFA a SOA zesilovače (vyznačen zeleně).

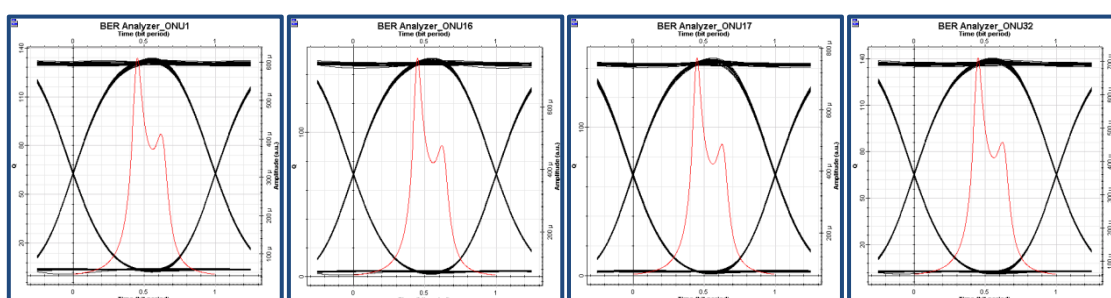


Obr. 8.71: Optické spektrum na konci přenosové trasy na straně ONU pro směr downlink a optické spektrum na konci přenosové trasy na straně OLT pro směr uplink.

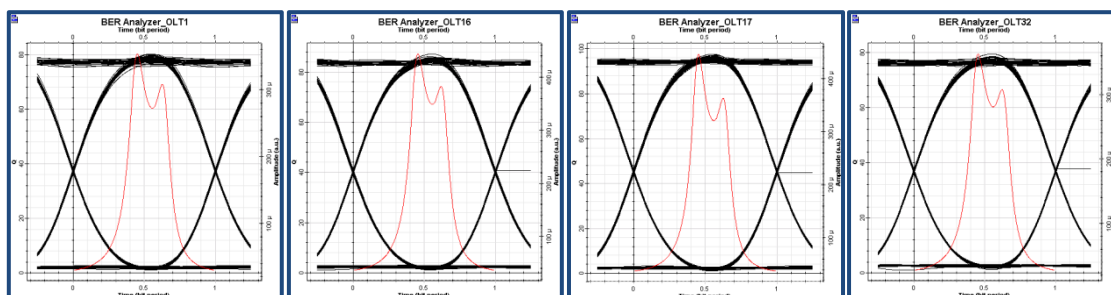
V tabulce 8.35 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Chybovost je stále všude nulová a hodnota Q-faktoru je vyšší než 6. Oproti předchozí trase se hodnoty Q-faktoru zvýšily ve směru downlink. Ve směru uplink zůstávají téměř stejné.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	133,775	0	80,209
16. kanál	0	151,571	0	87,113
17. kanál	0	146,826	0	97,674
32. kanál	0	140,426	0	79,456

Tab. 8.35: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.72: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.73: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 20 km

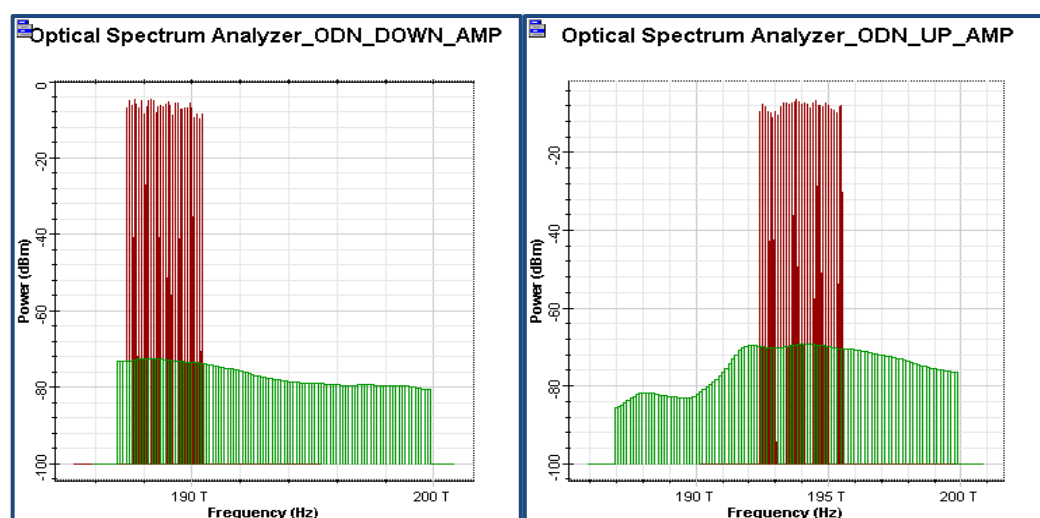
Délka optické trasy byla nastavena na 20 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.36. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonové úrovně za vysílačem zůstávají stejné.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-9,297	-8,652	-11,217
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-8,242	-8,652	-10,069
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-8,105	-8,652	-10,005
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-8,507	-8,652	-11,124
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	1,192	0	1,212

Tab. 8.36: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka mezi výkonovými úrovněmi už přesahuje 1 dBm.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy po zesilení. Výkonové rozdíly mezi jednotlivými kanály jsou již větší než u předchozích tras. Optický šum, který do signálu přidává Ramanův zesilovač, je ve směru downlink na stejné úrovni jako u předchozí trasy, ale ve směru uplink došlo opět k mírnému zvýšení (vyznačen zeleně).

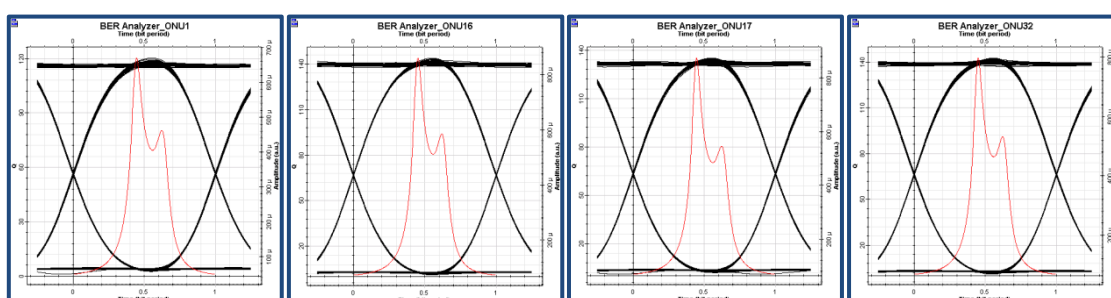


Obr. 8.74: Optické spektrum na konci přenosové trasy na straně ONU pro směr downlink a optické spektrum na konci přenosové trasy na straně OLT pro směr uplink.

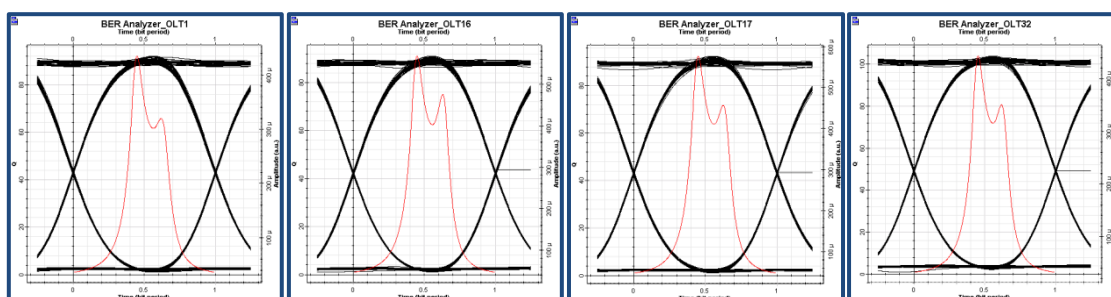
V tabulce 8.37 jsou zaznamenány hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Chybovost je stále všude nulová a hodnota Q-faktoru je vyšší než 6. Oproti předchozí trase se hodnoty Q-faktoru trochu poklesly. Ve směru uplink mírně stouply.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	120,310	0	92,084
16. kanál	0	143,736	0	91,050
17. kanál	0	135,140	0	92,491
32. kanál	0	142,542	0	103,778

Tab. 8.37: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.75: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy)



Obr. 8.76: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 25 km

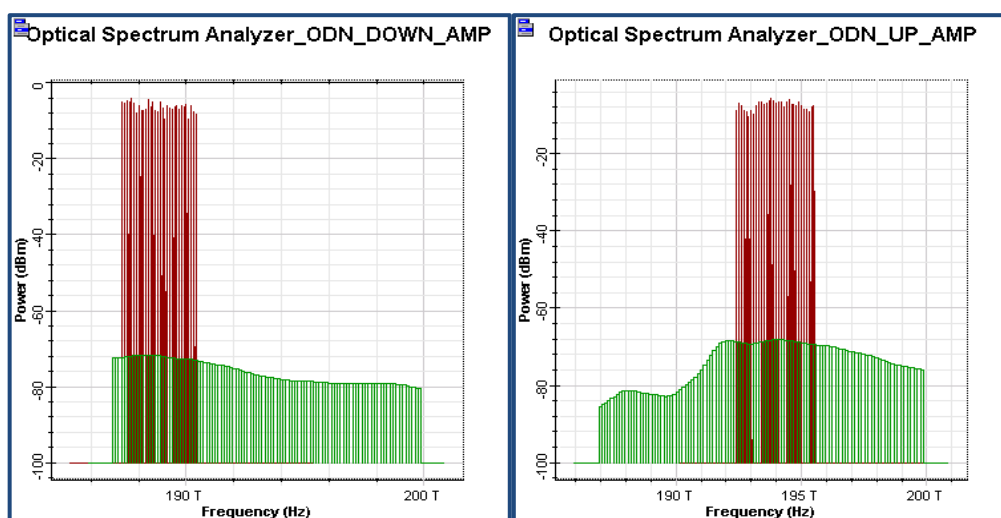
Délka optické trasy byla nastavena na 25 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.38. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonové úrovně za vysílačem zůstávají stejné.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-9,220	-8,652	-10,719
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-8,019	-8,652	-9,419
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-7,872	-8,652	-9,346
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-8,324	-8,652	-10,613
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	1,138	0	1,373

Tab. 8.38: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka mezi výkonovými úrovněmi přesahuje 1 dBm.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy po zesílení. Optický šum, který do signálu přidává Ramanův zesilovač, je ve směru downlink na stejné úrovni jako u předchozí trasy, ale ve směru uplink došlo opět k mírnému zvýšení (vyznačen zeleně).

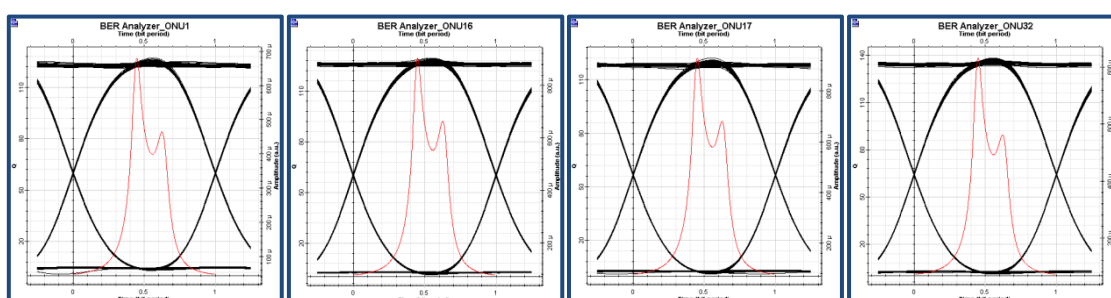


Obr. 8.77: Optické spektrum na konci přenosové trasy na straně ONU pro směr downlink a optické spektrum na konci přenosové trasy na straně OLT pro směr uplink.

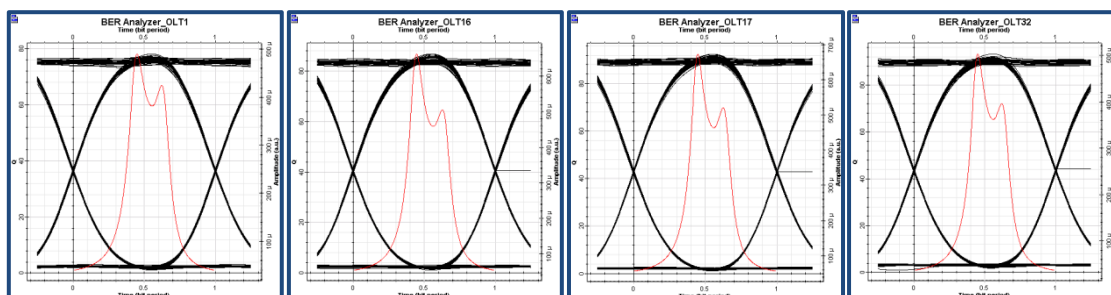
V tabulce 8.39 jsou zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Chybovost je stále všude nulová a hodnota Q-faktoru je vyšší než 6. Oproti předchozí trase se hodnoty Q-faktoru trochu poklesly v obou směrech.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	127,147	0	78,118
16. kanál	0	129,531	0	86,800
17. kanál	0	122,150	0	92,421
32. kanál	0	138,142	0	93,186

Tab. 8.39: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.78: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



Obr. 8.79: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Délka trasy: 30 km

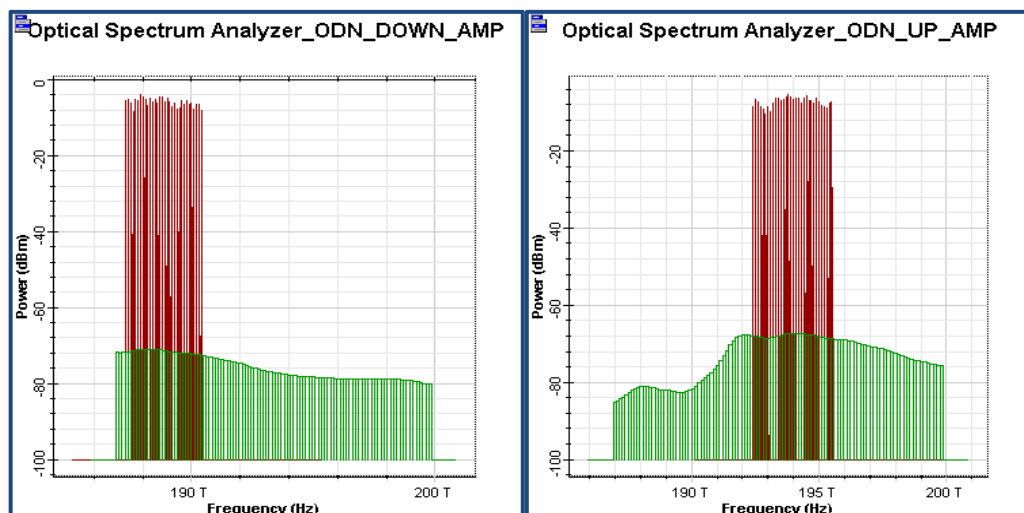
Délka optické trasy byla nastavena na 30 km. Zjištěné hodnoty výkonových úrovní pro tuto trasu jsou zaznamenány v tabulce 8.40. Na posledním řádku tabulky je uvedena maximální odchylka výkonových úrovní mezi kanálem s maximální výkonovou úrovní a kanálem s minimální výkonovou úrovní. Výkonové úrovně za vysílačem zůstávají stejné.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Za vysílačem	Před přijímačem	Za vysílačem	Před přijímačem
Výkon na 1. kanále [dBm]	-3,596	-9,357	-8,652	-10,531
Výkon na 16. kanále [dBm]	-3,652	-8,042	-8,652	-9,110
Výkon na 17. kanále [dBm]	-3,596	-7,885	-8,652	-9,031
Výkon na 32. kanále [dBm]	-3,596	-8,378	-8,652	-10,415
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	1,472	0	1,500

Tab. 8.40: Zjištěné výkonové úrovně na jednotlivých kanálech a jejich maximální odchylka.

Odchylka mezi naměřenými výkonovými úrovněmi se pohybuje okolo 1,5 dBm. Zesílení už je téměř stejné jako u předchozí trasy.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny optické spektra obou směrů - spektrum na konci optické trasy po zesílení. Můžeme si všimnout slabšího zesílení okolo 6. kanálu na trase uplink. Vzhledem k tomu, že zesílení je stejné jako u předchozí trasy, tak také optický šum je na stejné úrovni, jako u předchozí trasy (vyznačen zeleně).

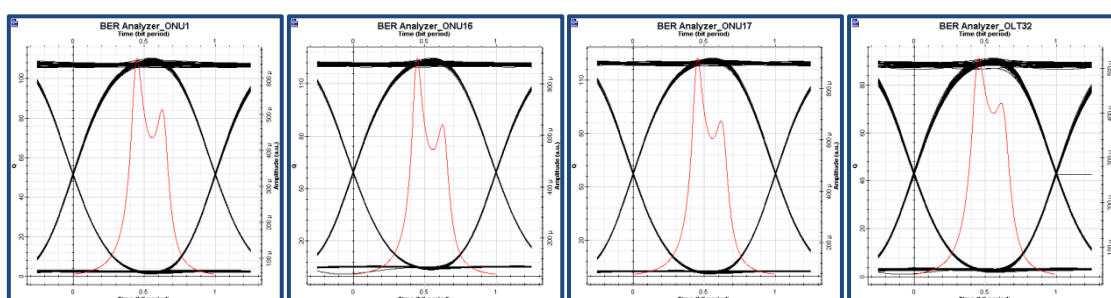


Obr. 8.80: Optické spektrum na konci přenosové trasy na straně ONU pro směr downlink a optické spektrum na konci přenosové trasy na straně OLT pro směr uplink.

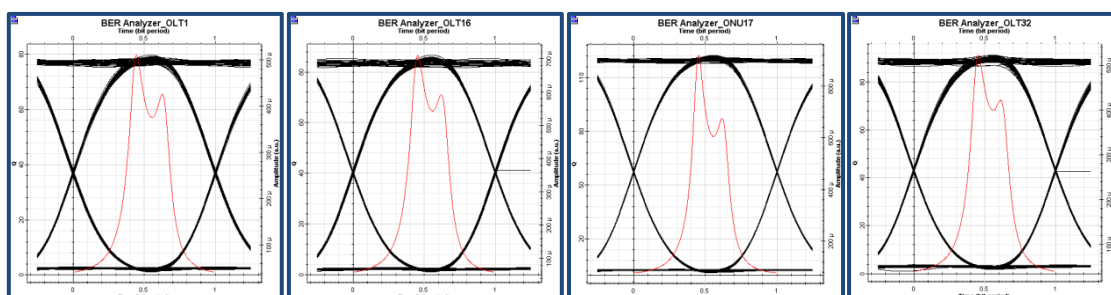
V tabulce 8.41 jsou zaznamenány hodnoty chybovosti a Q-faktoru na určených kanálech. Chybovost je stále všude nulová a hodnota Q-faktoru je vyšší než 6. Oproti předchozí trase se hodnoty Q-faktoru trochu poklesly v obou směrech.

	Downlink		Uplink	
Parametr	Chybovost (BER)	Q-faktor	Chybovost (BER)	Q-faktor
1. kanál	0	110,384	0	79,629
16. kanál	0	124,607	0	86,634
17. kanál	0	122,339	0	81,129
32. kanál	0	129,452	0	91,278

Tab. 8.41: Zjištěné hodnoty chybovosti a Q-faktoru pro oba směry.



Obr. 8.81: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr downlink (na konci trasy).



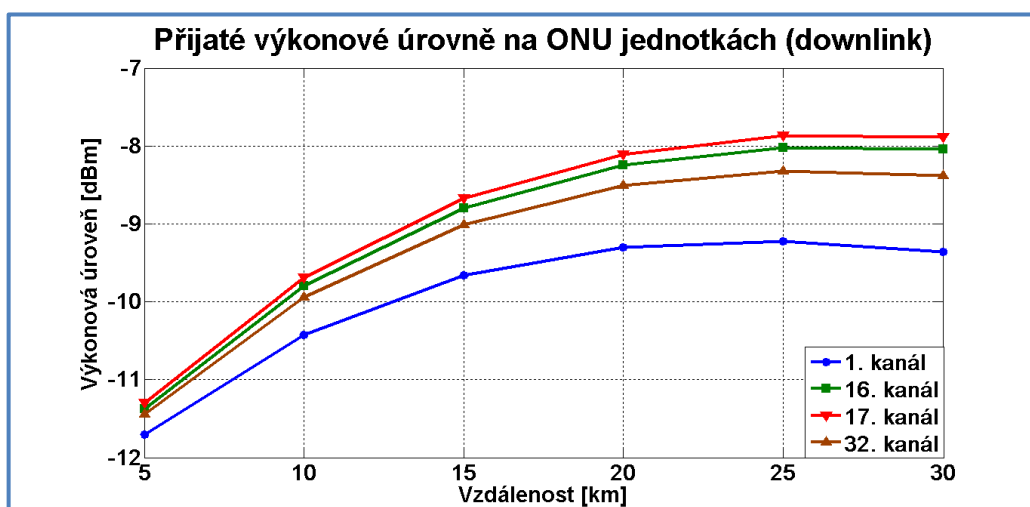
Obr. 8.82: Diagramy oka pro kanály 1,16,17 a 32, směr uplink (na konci trasy).

Pokud porovnáme diagramy oka na trase o délce 30 km s trasou o délce 5 km, můžeme si všimnout, že do 15 km kvalita signálu stále stoupala a od 20 km začala kvalita mírně klesat. Nicméně hodnota Q-faktoru je stále vysoká, tudíž by se tento zesilovač dal použít i pro vyšší přenosové rychlosti.

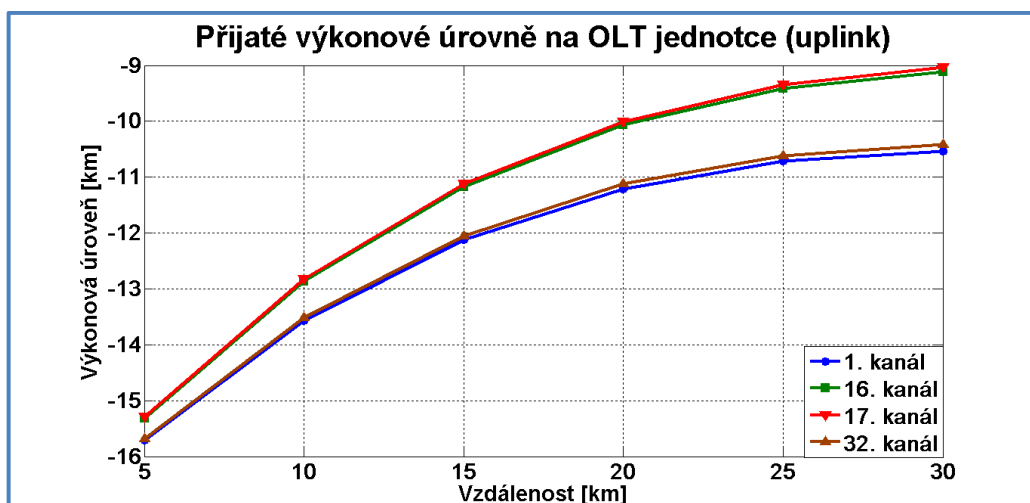
Grafické zobrazení naměřených hodnot

Následující grafy zobrazují přijaté výkonové úrovně na ONU jednotkách a OLT jednotkách, chybovost a Q-faktor pro kanály 1, 16, 17 a 32. Přenosová rychlost byla nastavena na $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ symetricky. Z grafů je patrné, že hodnota Q-faktoru se pohybuje mezi hodnotami 60 a 160 (v závislosti na vzdálenosti). Hodnoty Q-faktoru u obou směrů stoupaly do 15-20 km a od této vzdálenosti začaly mírně klesat. Ve srovnání s polovodičovým optickým zesilovačem jsou zjištěné hodnoty kvality několikanásobně větší. Hodnota Q-faktoru je také lepší, než u EDFA zesilovače.

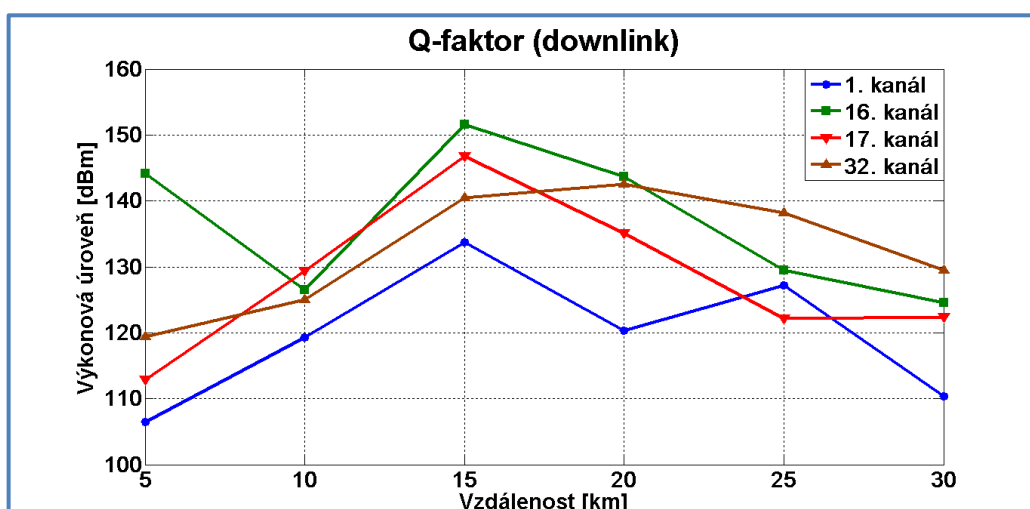
Co se týče zesílení, je Ramanův zesilovač (typ DRA) vhodnější na delší optické trasy (více jak 20 km). Ve srovnání s EDFA zesilovačem má slabší zesílení na kratších trasách (hlavně ve směru uplink).



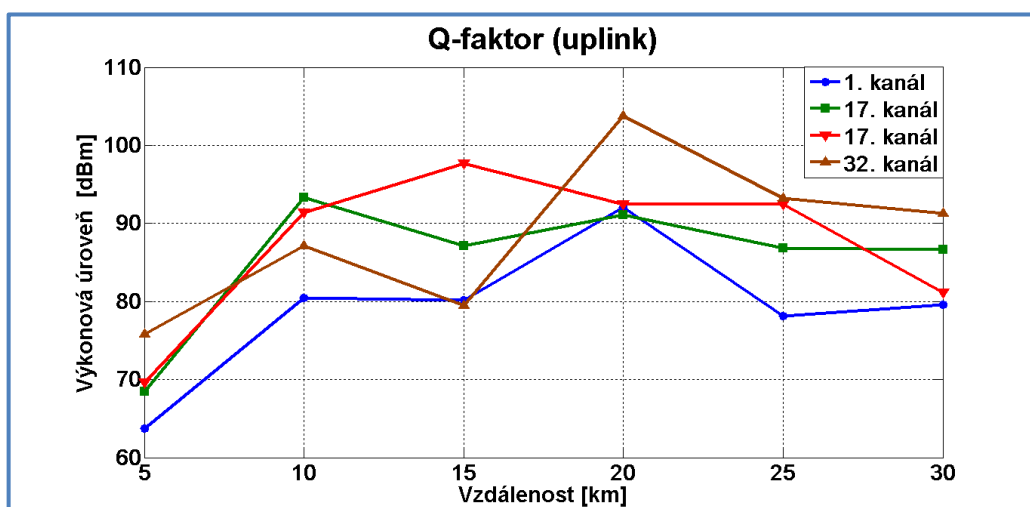
Obr. 8.83: Přijaté výkonové úrovně na ONU jednotkách pro směr downlink.



Obr. 8.84: Přijaté výkonové úrovně na OLT jednotce pro směr uplink.



Obr. 8.85: Hodnoty Q-faktoru na ONU jednotkách pro směr downlink.

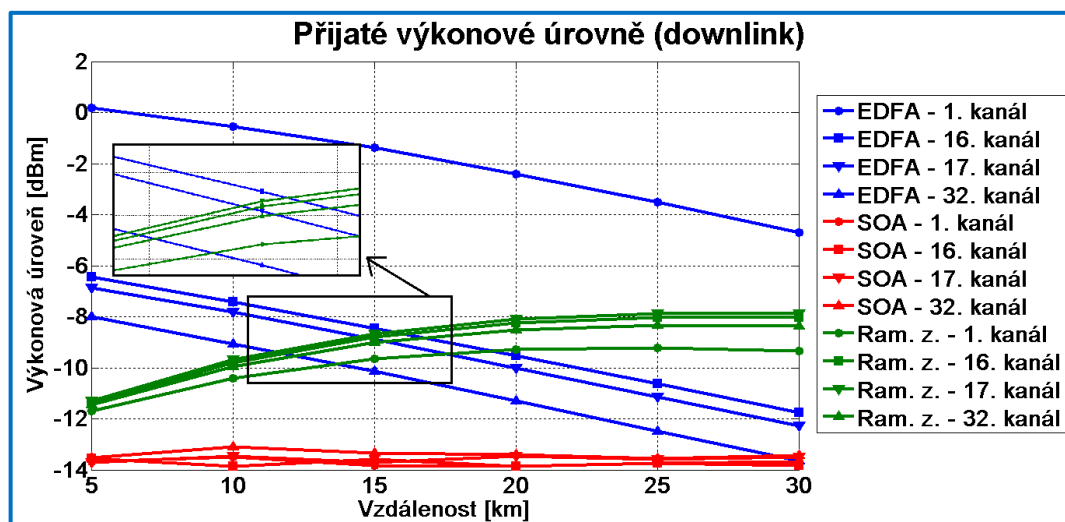


Obr. 8.86: Hodnoty Q-faktoru na OLT jednotce pro směr uplink.

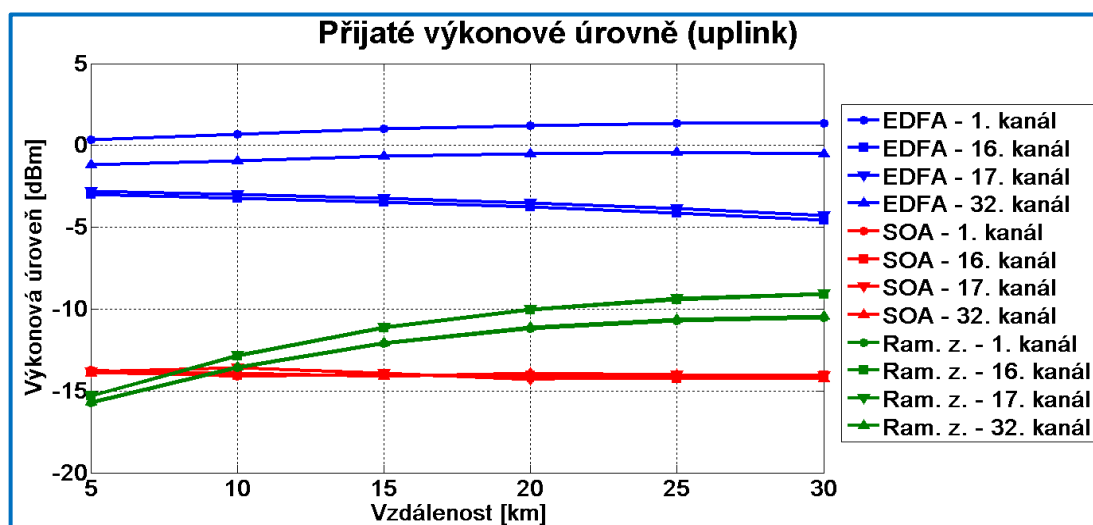
9. Vyhodnocení

9.1. Přijaté výkonové úrovně

Pokud srovnáme přijaté výkonové úrovně u všech tří typů optických zesilovačů, tak nejlepší výsledky má vláknový optický zesilovač (EDFA) a Ramanův zesilovač. Pro získání co nejvyšší výkonové úrovně na konci optické trasy pro směr downlink by bylo nejvhodnější nasadit vláknový zesilovač na kratších trasách - zhruba do 15 km. Od této vzdálenosti měla lepší výsledky optická trasa s Ramanovým zesilovačem. Pro směr uplink měl nejlepší výsledky zjištěných výkonových úrovní vláknový zesilovač na všech délkách optických tras. Dokonce naměřená výkonová úroveň pro směr uplink byla vyšší než pro směr downlink (zhruba o 4–12 dBm) i když vysílací výkon na straně ONU pro směr uplink byl nastaven na -6 dBm a na straně OLT pro směr downlink na -1 dBm. Tento jev mohl být způsoben faktem, že vláknový zesilovač lépe zesiluje vlnové délky v C pásmu (použito pro směr uplink) a také více zesiluje nižší výkonové úrovně. Rovněž si můžeme všimnout velkých rozdílů zesílení pro jednotlivé kanály (rozdíl je až 8 dBm). U Ramanova zesilovače dochází k vyššímu zesílení signálu s rostoucí délkou optické trasy - na zesílení má vliv kromě výkonu čerpacího zdroje, také délka vlákna, ve kterém probíhá zesílení. Rozdíly výkonových úrovní mezi jednotlivými kanály jsou u tohoto zesilovače minimální (do 2 dBm). Nejmenší zjištěné výkonové úrovně byly naměřeny na trase s polovodičovým optickým zesilovačem (SOA). Toto bylo způsobeno nastavenou hodnotou injekčního proudu na 100 mA. Výkonové úrovně u polovodičového optického klesaly minimálně, což je způsobeno faktem, že výkon, který vcházel do tohoto zesilovače byl stále vysoký na to, aby mohl být ještě zesílen. Na obr. 9.1 a 9.2 je srovnání přijatých výkonových úrovní na jednotlivých optických trasách s aplikovaným optickým zesilovačem.



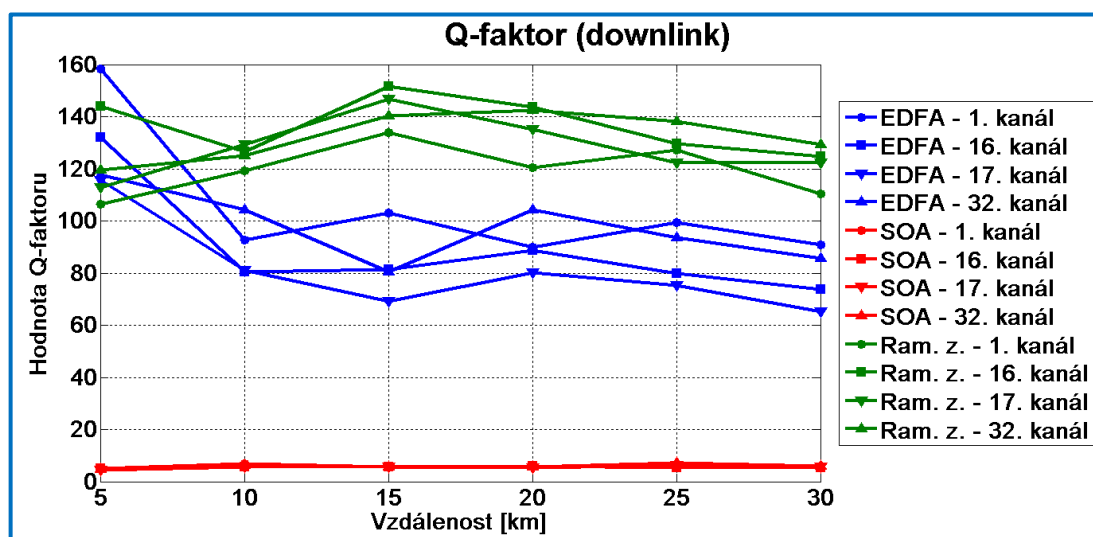
Obr. 9.1: Srovnání přijatých výkonových pro optické trasy s EDFA, SOA a Ramanovským zesilovačem na ONU jednotkách (downlink).



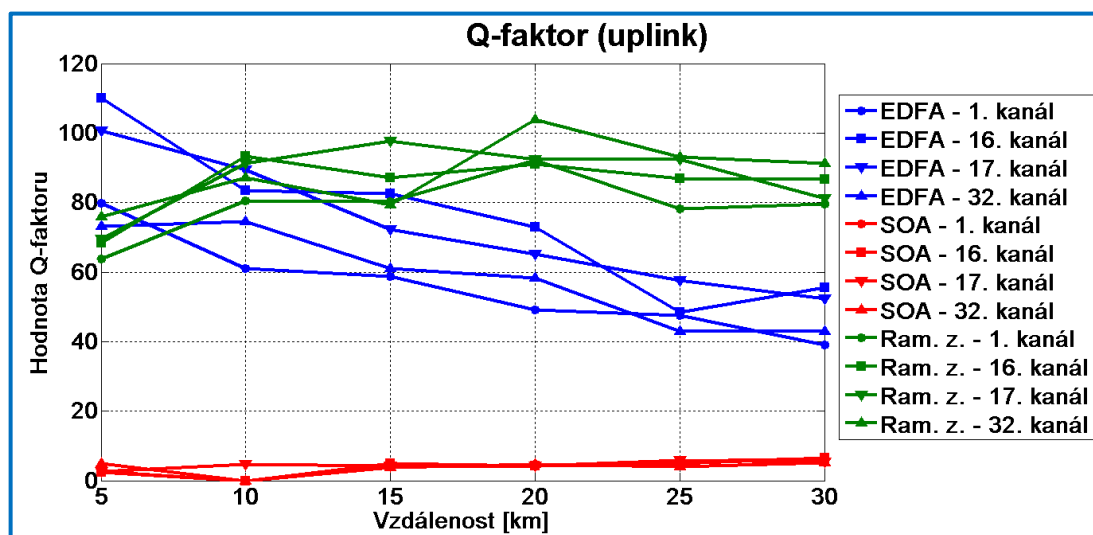
Obr. 9.2: Srovnání přijatých výkonových pro optické trasy s EDFA, SOA a Ramanovským zesilovačem na OLT jednotce (uplink).

9.2. Q-faktor a chybovost

Nevyšším faktorem kvality a nejmenší chybovostí BER opět disponuje vláknový optický zesilovač (EDFA) a Ramanův zesilovač. Při délce optické trasy 5 km má nejlepší Q-faktor vláknový optický zesilovač (až 160), na vyšších vzdálenostech už disponuje lepším faktorem kvality Ramanův zesilovač (pro oba směry). Chybovost měly oba zesilovače na všech délkách optických tras nulovou. Maximální přípustná chybovost v optických komunikacích je 10^{-12} a Q-faktor musí být vyšší než 6. Můžeme si všimnout, že pro oba výše uvedené zesilovače byla tato podmínka splněna. U polovodičového optického zesilovače (SOA) se pohybovala chybovost od 10^{-13} do 10^{-6} pro směr downlink a pro směr uplink od 10^{-11} do 1. Hodnota faktoru kvality se pohybovala od 4 do 7 pro směr downlink a pro směr uplink od 0 do 7. Tyto hodnoty nejsou dostatečné pro zajištění bezchybného přenosu. Pro zajištění požadované chybovosti a Q-faktoru u polovodičového optického zesilovače by bylo nutné snížit přenosovou rychlost z $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ na $1,25 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ v obou směrech. Na obr. 9.3 a 9.4 je přehled hodnot Q-faktoru pro jednotlivé optické trasy s aplikovaným optickým zesilovačem.



Obr. 9.3: Srovnání hodnot Q-faktoru pro optické trasy s EDFA, SOA a Ramanovským zesilovačem na ONU jednotkách (downlink).



Obr. 9.4: Srovnání hodnot Q-faktoru pro optické trasy s EDFA, SOA a Ramanovským zesilovačem na OLT jednotce (uplink).

10. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést porovnání různých typů optických zesilovačů implementovaných do metropolitních optických sítí v rámci softwarové aplikace Optiwave OptiSystem.

V první kapitole jsou teoreticky popsány optické přístupové sítě, jejich parametry a specifiky. Také jsou zde popsány metropolitní optické sítě.

Druhá kapitola se zabývá teoretickým popisem optických zesilovačů, výhodami a nevýhodami jejich nasazení na optické trase.

V dalších kapitolách (kapitola 3–7) se podrobně rozebírají všechny tři typy optických zesilovačů, princip fungování, jejich vlastnosti, výhody a nevýhody (vláknový optický zesilovač (EDFA), polovodičový optický zesilovač a Ramanův zesilovač).

V osmé kapitole je provedena simulace v programu Optisystem 13, ve kterém je nasimulovaná obousměrná WDM-PON síť pro 32 účastníků. Přenosová rychlost byla nastavena na $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ v obou směrech. Pro směr downlink bylo použito pásmo L a pro směr uplink bylo použito pásmo C. Délka optické trasy mezi OLT jednotkou a ONU jednotkami byla nastavena na 5, 10, 15, 20, 25 a 30 km. Do této optické trasy byl později aplikován příslušný optický zesilovač s nastavenými parametry, které odpovídaly parametrům reálného optického zesilovače. Hlavní náplní této práce bylo porovnat jednotlivé optické zesilovače mezi sebou z pohledu chybovosti, Q-faktoru, výkonových a útlumových bilancí.

V poslední kapitole jsou shrnuty nasimulované výsledky. Tyto výsledky odpovídaly teoretickým hodnotám - nejvyšší přijaté výkonové úrovně byly na trase s vláknovým optickým zesilovačem (EDFA) a Ramanovským zesilovačem. Tyto zesilovače měly kromě vysokého zisku také nízké šumové číslo a díky tomu lepší Q-faktor a chybovost BER. Naopak nejhorší výsledky byly nasimulovány u polovodičového optického zesilovače (SOA), který disponuje oproti vláknovému optickému zesilovači a Ramanovskému zesilovači nižším ziskem a vyšším šumovým číslem, které zapříčinilo vysokou chybovost BER a nízký Q-faktor.

Použitá literatura

- [1] BUBNÍK, Lukáš; KLAJBL, Jiří; MAZUCH, Petr. *Optické přístupové sítě* [online]. 2011 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/11.html>.
- [2] SCHLITTER, P. *Optické přístupové sítě* [online]. 2004 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072807>. ISSN 1214-9675.
- [3] LAFATA, P. *Pasivní optické sítě* [online]. 2011 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cisloclanku=2011030001>.
- [4] LAFATA, P. *Pasivní optické sítě WDM-PON* [online]. 2009 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>.
- [5] RAMASWAMI, Rajiv; SIVARAJAN, N. Kumar; SASAKI, H. Galen. *Optical Networks - A Practical Perspective Third Edition* [online]. 2010 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://ece.iisc.ernet.in/photonics_web/pdf/kumar.pdf.
- [6] FINISAR CORPORATION. *Introduction to Optical Amplifiers* [online]. 2010 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <https://www.finisar.com/sites/default/files/resources/Introduction%20to%20Optical%20Amplifiers.pdf>.
- [7] LUCKI, Michal. *Optické zesilovače* [online]. 2013 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/162.pdf.
- [8] YAO, Colin. *Optical amplifiers in fiber optic communication system* [online]. 2012 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/optical-amplifiers-in-fiber-optic-communication-systems/>.
- [9] BECKER, Philippe C.; OLSSON, N. Anders; SIMPSON, Jay R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers : Fundamentals and Technology*. San Diego: Academic Press, 1999. 460 s. ISBN 0-1208-4590-3.
- [10] *Ytterbium doped fiber amplifier* [online]. 2013 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://www.optilab.com/products/category/ydfa/ytterbium-doped_fiber_amplifier Rackmount/.
- [11] BURČÍK, J. *Ramanovské zesilovače pro telekomunikace* [online]. 2006 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032401>. ISSN 1214-9675.
- [12] THE MATHWORKS. *Optical communication system design project* [online]. 2014 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://www.mathworks.com/products/_detail/product_35663.html.

- [13] ITU-T. G.694.1 : *Spectral grids for WDM applications* [online]. 2008
[cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-200206-S/en>.
- [14] VONDRÁŽKA, Jiří. *Chybovost při přenosu digitálního signálu* [online]. 2013
[cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/059.pdf.
- [15] TEJKAL, Vladimír; FILKA, Miroslav; REICHERT, Pavel; ŠPORIK, Jan.
Dvoustavové modulační formáty v optických přístupových sítích
[online]. 2010 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z:
<http://dSPACE.vsb.cz/bitstream/handle/10084/84189/AEEE-2010-8-4-96-tejkal.pdf?sequence=1>.